

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



GRADO INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

Modelado y Simulación de un Bogie

Autora: Dña. Beatriz Mora Ramos
Tutor: D. Rubén Oliva Domínguez
Cotutora: Dra. Dña. María Jesús López Boada

2014

Agradecimientos

A mi familia y amigos,

y en especial a Rubén, por su inconmensurable ayuda.

RESUMEN

La suspensión es uno de los componentes más importantes de un vehículo ferroviario. El bogie es la parte del vehículo que engloba todos los elementos de la suspensión, el tren de rodaje y que soporta el peso del coche.

Un diseño erróneo del bogie afecta directamente al confort y la seguridad de los pasajeros, al comportamiento del vehículo y a su rendimiento, además de a los costes de fabricación y mantenimiento.

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el modelado en SolidEdge del bastidor de un bogie de un vehículo ferroviario para su posterior análisis en el programa PTC-Creo.

El valor de las cargas aplicadas en el bastidor es obtenido mediante una simulación en SimPack. El programa PTC-Creo Simulate ofrece, como resultados del análisis estático, una previsión de los valores máximos de las tensiones principales, desplazamientos y tensión de Von Mises.

ABSTRACT

The suspension is one of the most important component in a railway vehicle. The safety of these vehicles depends directly on the suspension.

A bogie is the whole group of all the elements that form the suspension of the train. A good bogie model in a train affects mainly the passenger comfort, the efficiency of the machine and the costs.

The main goal of this Project is modeling a stretcher of a bogie, and simulates it, in order to study the behavior of the railway suspension.

SolidEdge is a computer aided design wich is used in the modeling of the bogie. The model is implemented in PTC-Creo software in order to do a static analysis. PTC-Creo Simulate shows the results for maximum principal strain, displacement and Von Misses stress on the model.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Introducción | 2 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Estructura del Proyecto..... | 3 |
| Capítulo 2. Vehículos ferroviarios | 5 |
| 2.1. Introducción | 6 |
| 2.1.1 Automotor eléctrico S-446..... | 7 |
| 2.1.2. Automotor eléctrico S-447..... | 12 |
| 2.2. Elementos de un vehículo ferroviario | 17 |
| 2.2.1 Caja..... | 18 |
| 2.2.2 Equipo eléctrico de potencia y control | 20 |
| 2.2.3 Sistemas de frenos..... | 21 |
| 2.2.4 Equipos auxiliares y neumáticos..... | 21 |
| 2.2.5 Sistema rodante..... | 22 |
| 2.2.6. Bogies | 23 |
| 2.3 Suspensiones en vehículos ferroviarios: bogie | 43 |
| 2.3.1 Clasificación de los bogies de acuerdo al número de ejes..... | 43 |
| 2.3.2 Bogie articulado y no articulado | 44 |
| 2.3.3 Clasificación de los bogies según la estructura de la suspensión..... | 45 |
| 2.3.4 Bogies soportados y semisoportados | 47 |
| Capítulo 3. Modelado en Elementos Finitos | 53 |
| 3.1 Método de Elementos Finitos | 54 |
| 3.2 Descripción del programa solidEdge..... | 57 |
| 3.3. Modelado de un bogie en Solid Edge..... | 57 |
| 3.2.1 Entorno pieza | 58 |
| 3.2.2. Entorno conjunto..... | 65 |
| Capítulo 4. Obtención de las fuerzas soportadas por el bastidor en SimPack | 71 |
| Capítulo 5. Importación a PTC-Creo | 87 |
| 5.1. Conceptos teóricos..... | 88 |
| 5.2. Primeros ensayos | 91 |

| | |
|--|------------|
| 5.3. Rediseño | 95 |
| 5.4. Importación a PTC-Creo..... | 97 |
| Capítulo 6. Resultados..... | 103 |
| Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros | 107 |
| 7.1. Conclusiones..... | 108 |
| 7.2. Trabajos futuros | 109 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Mapa Adif, red ferroviaria española [3]..... | 6 |
| Figura 2.2. Automotor eléctrico S-446 [2]..... | 7 |
| Figura 2.3. Automotor eléctrico S-446 [2]..... | 8 |
| Figura 2.4. Distribución interior S-446 | 11 |
| Figura 2.5. Automotor Eléctrico S-447 | 12 |
| Figura 2.6. Acoplamiento Múltiple | 13 |
| Figura 2.7. Distribución interna automotor eléctricoS-447..... | 16 |
| Figura 2.8. Caja vehículo serie 447 | 18 |
| Figura 2.9. Acople de tope y cadena (izquierda) y acople de eslabón y perno (derecha)..... | 19 |
| Figura 2.10. Acoples automáticos de Scharfenberg (izquierda) y Janney (derecha)..... | 20 |
| Figura 2.11. Comparación entre ejes simples y bogies en paso por curva | 23 |
| Figura 2.12. Comparación del efecto de irregularidades en la vía entre un bogie de ejes simples y un bogie de dos ejes [5] | 24 |
| Figura 2.13. Juegos de ruedas con cojinetes internos y externos..... | 25 |
| Figura 2.14. Los juegos de ruedas con discos de freno en el eje en la rueda [5] | 25 |
| Figura 2.15. Juegos de ruedas de material rodante de tracción con posición de engranajes asimétrica y simétrica [5] | 26 |
| Figura 2.16. Conjunto de juego de ruedas y eje sobre la vía | 26 |
| Figura 2.17Caja de grasa para ferrocarriles [6] | 27 |
| Figura 2.18. Partes de la caja de grasa..... | 28 |
| Figura 2.19. Diseños de rodamientos de rodillos: (a)cilindro de dos hileras (b) autoalineado de una hilera (c) cónico de dos hileras [5] | 29 |
| Figura 2.20. Cajas de grasa de alta velocidad (a) triple rodamiento en trenes de alta velocidad japoneses (b) triple rodamiento en trenes de alta velocidad franceses..... | 30 |
| Figura 2.21. Fotografía de una rueda ferroviaria | 31 |
| Figura 2.22. Resorte helicoidal..... | 33 |
| Figura 2.23. Barra de torsión..... | 34 |
| Figura 2.24. Ballesta | 35 |
| Figura 2.25. Fotografía del montaje de ballesta en un bogie | 36 |
| Figura 2.26 Fotografía del montaje de ballesta en un bogie | 37 |
| Figura 2.27. Resorte caucho-metal | 37 |
| Figura 2.28. Esquema bogie | 39 |
| Figura 2.29. Amortiguador en bogie | 40 |
| Figura 2.30. Bogie con amortiguadores de fricción | 41 |
| Figura 2.31. Cilindro monotubo (derecha), cilindro bitubo (izquierda) | 42 |

| | |
|--|-----|
| Figura 2.32. Comparación del efecto de las irregularidades de la vía entre el bogie de un eje y el de dos ejes | 44 |
| Figura 2.33. Comparación entre coche con bogies articulados y no articulados | 44 |
| Figura 2.34. Bogie de barra de suspensión oscilante..... | 46 |
| Figura 2.35. Bogie de resorte soportado con pequeña rigidez lateral | 46 |
| Figura 2.36. Bogie soportado | 47 |
| Figura 2.37. Bogie semi-soportado | 48 |
| Figura 2.38. Efecto de la suspensión primaria e el guiado de la rueda [12] | 50 |
| Figura 2.39. Suspensión primaria en bogie | 50 |
| Figura 2.40. Suspensión secundaria en bogie | 51 |
| Figura 3.1. Plataforma inferior | 60 |
| Figura 0.2. Ala superior | 62 |
| Figura 5.1.Lugar de Plastificación según Criterio Von Mises | 90 |
| Figura 5.2.Asignación de material | 91 |
| Figura 5.3.Restricciones y aplicación de cargas al modelo | 92 |
| Figura 5.4.Fallo en el análisis estático | 92 |
| Figura 5.5.Diagnóstico de fallo en geometría interna | 93 |
| Figura 5.6.Pieza original con bordes redondeados | 94 |
| Figura 5.7.Pieza modificada | 94 |
| Figura 5.8.Modificación en SolidEdge de una de las piezas del bastidor | 95 |
| Figura 5.9.Ensamblado con piezas modificadas | 96 |
| Figura 5.10.Conjunto modificado..... | 96 |
| Figura 5.11.Asignación de Material | 97 |
| Figura 5.12.Acción de la Gravedad | 98 |
| Figura 5.13.Restricciones al Movimiento..... | 99 |
| Figura 5.14. Fuerzas aplicadas en la suspensión secundaria | 100 |
| Figura 5.15.Fuerza aplicada en la suspensión primaria | 101 |
| Figura 6.1.Diagnóstico en PTC-Creo Simulate..... | 104 |
| Figura 6.2. Resultados de la tensión de Von..... | 105 |
| Figura 6.3. Resultados del desplazamiento | 105 |
| Figura 6.4.Resultados de la fuerza principal máxima | 106 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1. Especificaciones técnicas automotor eléctrico S-446 [2] | 9 |
| Tabla 2.2. Dimensiones automotoe eléctrico S-446 [2]..... | 10 |
| Tabla 2.3. Pesos automotor eléctrico S-446 [2]..... | 10 |
| Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del automotor eléctrico S-446 [2]..... | 14 |
| Tabla 2.5. Dimensiones automotor eléctrico S-447 [2]..... | 15 |
| Tabla 2.6. Pesos del automotor eléctrico S-447[2] | 15 |
| Tabla 3.1. Elementos del subconjunto traviesa-pivote | 66 |
| Tabla 5.1.Fuerza aplicada en la suspensión secundaria | 100 |
| Tabla 5.2. Fuerza en la suspensión primaria..... | 100 |

Capítulo 1. Introducción

En esta sección se hace una breve introducción del contenido del proyecto y de sus objetivos, explicando las herramientas digitales que se van a utilizar y los métodos empleados.

1.1. Introducción

El ferrocarril es uno de los medios de transportes más seguros y eficaces, por esta razón se trata de un sector que continúa a la vanguardia del desarrollo tecnológico para una constante optimización.

El sistema de suspensión es un elemento clave en los vehículos ferroviarios, siendo responsable del control de las vibraciones producidas por las irregularidades de la vía para mantener la estabilidad del vehículo, proporcionando mayor confort y seguridad a sus pasajeros.

1.2. Objetivos

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es el estudio del comportamiento de la estructura del bastidor de un bogie sometido a solicitaciones externas.

En un primer lugar, se modela un bogie en el programa SolidEdge a partir de los planos facilitados por el departamento. Se crean las piezas y se ensamblan posteriormente.

Se lleva a cabo la implementación del diseño en el programa PTC-Creo, para realizar un análisis estático del bastidor. Para obtener los datos necesarios para llevar a cabo el análisis estructural, se emplea el programa SimPack.

En SimPack, se simula el comportamiento de la suspensión con el tren en movimiento, y se obtienen los esfuerzos aplicados en la suspensión primaria y secundaria del vehículo. Los valores obtenidos en la simulación son usados como aplicación de carga en el análisis estático del bastidor en el programa PTC-Creo.

Los resultados del análisis dan una previsión de las deformaciones que aparecerán en la estructura y los puntos más críticos del diseño, donde comenzará la fluencia del material. Los sistemas de ingeniería asistida por ordenador permiten tener un diagnóstico acertado del comportamiento del diseño para posibles mejoras.

1.3. Estructura del Proyecto

Este Trabajo de Fin de Grado consta de 7 partes, siendo la primera de ellas la presente Introducción. A continuación, se describen los capítulos por los que está compuesto el trabajo:

- Capítulo 2: "Vehículos Ferroviarios", donde se hace una exposición de los conceptos básicos del campo del ferrocarril, así como los componentes de un vehículo ferroviario, tomando especial atención a la suspensión.
- Capítulo 3: "Modelado de Elementos Finitos", en esta sección se muestra el proceso seguido en el diseño del bogie, desde el modelado de las piezas hasta su posterior ensamblado.
- Capítulo 4: "Obtención de las Fuerzas Soportadas por el Bastidor en SimPack", en este apartado se explica cómo se obtienen los valores de las cargas aplicadas al bastidor.
- Capítulo 5: "Importación al PTC-Creo", esta parte del Trabajo contempla la implementación del modelo en PTC-Creo para su análisis.
- Capítulo 6: "Resultados", en este capítulo se exponen los resultados obtenidos en el análisis en el programa PTC-Creo.
- Capítulo 7: "Conclusiones y Trabajos Futuros", en esta sección se hace una reflexión de todo el Trabajo, se hace una valoración de los resultados obtenidos, y se plantean posibles mejoras y alternativas de diseño.

Capítulo 2. Vehículos ferroviarios

El ferrocarril es uno de los medios de transporte terrestre de mayor relevancia en todo el mundo debido a su competitividad en consumo de combustible, capacidad de carga para transportar mercancía y comodidad para pasajeros. Esto hace que, desde sus comienzos en el siglo XVII éste medio de transporte no haya dejado de desarrollarse para seguir en la actualidad a la vanguardia de la tecnología.

2.1. Introducción

La red de ferroviaria española se extiende por todo el territorio, permitiendo la circulación de más de 5.000 trenes, de viajeros y de mercancías, con seguridad, puntualidad y rapidez.

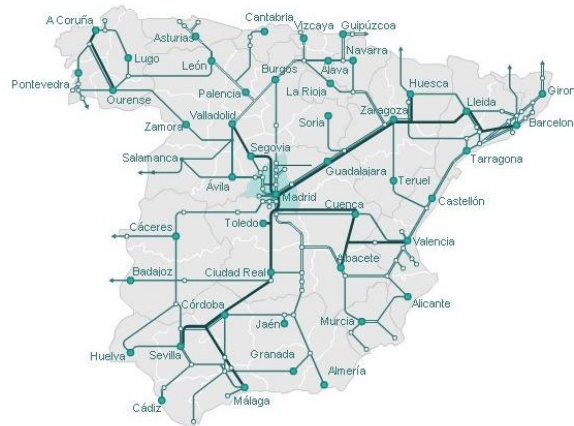


Figura 2.1. Mapa Adif, red ferroviaria española [3]

Renfe Cercanías es una sección de la compañía ferroviaria española *Renfe Operadora*, dedicada a la gestión y explotación de redes de cercanías, que unen los diferentes núcleos de un área metropolitana mediante líneas de alta capacidad y frecuencia [1].

Actualmente, los coches que se emplean principalmente son los de la serie 446 y 447, ambos son modelos externamente iguales, pero el modelo más actual, el 447, incorpora mejoras con respecto al primero en cuanto a características técnicas y prestaciones para los pasajeros.

A continuación se hace una breve exposición del tipo de vehículo empleado en la red de cercanías española y sus principales características.

2.1.1 Automotor eléctrico S-446

Esta serie surgió en los años 80 ante las necesidades surgidas por el fuerte aumento de la demanda del transporte en las grandes metrópolis españolas. En principio, se desarrolló el prototipo 445.001, construido por fabricantes nacionales con el apoyo del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI).

Esta iniciativa fue modificada para construir la serie 446, que cuenta con una configuración diferente (M-R-M) la cual consiste en tres coches: dos coches motor o tractores en los extremos y un coche remolque en la posición intermedia. Además, el nuevo modelo posee mayor potencia, superior a los 2000kW, una aceleración de más de 1m/s^2 , una distribución interior que permite transportar a 700 personas, mayor accesibilidad y nuevas prestaciones para los clientes.

En 2005 comenzó un proceso para la modernización y ampliación de la vida útil de esta serie [2]. En la figura 2.2, se observa un automotor eléctrico de la serie 446.



Figura 2.2. Automotor eléctrico S-446 [2]

A finales de los años 80 y ante la fuerte demanda social que exigía un transporte de calidad en las cercanías de las grandes ciudades españolas y la ausencia de un material idóneo para este tipo de servicios, Renfe decidió adquirir un material diseñado específicamente para satisfacer este tipo de tráficos.

Estos nuevos trenes debían caracterizarse por una mayor potencia específica para desarrollar mayores aceleraciones, debido a las numerosas paradas y a las distancias cortas existentes entre las estaciones, y una distribución interior que permitiera una mayor capacidad en lo que se refiere a plazas de pie.

Con estas exigencias, se construyó la unidad 445.001, que se concibió para ensayar diversas soluciones innovadoras. El prototipo fue desarrollado y construido por cinco fabricantes nacionales (MTM, GEE, Macosa, CAF y WESA) con el apoyo financiero del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI).

Los resultados negativos de las pruebas de este prototipo impulsaron a Renfe a renunciar a este vehículo. Sin embargo, las reflexiones derivadas de la unidad 445 permitieron avanzar en el diseño de las futuras unidades de cercanías.

Las unidades de la serie 446 han sido la primera serie de material de Renfe diseñada específicamente para el servicio de cercanías, destacando por su fiabilidad, fácil mantenimiento, elevado confort y reducido consumo energético, así como por sus excelentes prestaciones de aceleración y deceleración, que las han hecho idóneas para éste tipo de servicios.

En total, fueron adquiridos 170 trenes de la serie 446 de los cuales y como consecuencia del atentado del 11 de marzo de 2004, tres han sido Automotor eléctrico S-446 dados de baja. Todos los trenes de la serie 446 fueron contruidos por CAF, Cenemesa, Conelec, Macosa, M.T.M y Melco. En la figura 2.3 se observa un automotor eléctrico de la serie 446.



Figura 2.3. Automotor eléctrico S-446 [2]

En la tabla 2.1, se incluyen las especificaciones técnicas del automotor eléctrico de la serie 446.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas automotor eléctrico S-446 [2]

| | |
|--|--|
| Composición | M-R-M |
| Ancho de vía | 1 668 mm |
| Tensión de alimentación | 3000 Vcc |
| Composición múltiple | Hasta 3 unidades de tren |
| Potencia en régimen continuo | 2 400 Kw |
| Motores | 8 de cc de 320 Kw (4 por cada coche motor) |
| Tipo de motor | Corriente continua 1 500V |
| Esfuerzo tractor máximo en llantas | 190 KN |
| Esfuerzo tractor máximo en el arranque | 225 KN |
| Esfuerzo tractor a la velocidad máxima | 60 KN |
| Velocidad máxima | 100 Km/h |
| Aceleración en arranque | 1m/s ² |
| Aceleración entre 0 y 60 Km/h | 0.75 m/s ² |
| Aceleración entre 0 y 100 Km/h | 0.55 m/s ² |
| Deceleración normal (freno eléctrico y neumático) | 1.0 m/s ² |
| Deceleración freno eléctrico | 0.7 m/s ² |
| Deceleración máxima de emergencia | 1.2m/s ² |
| Arranque en rampa | 35 m/s ² |
| Alimentación de auxiliares | 2 convertidores estáticos |
| Entrada energía al convertidor | 3 000Vcc |
| Salida energía a auxiliares | 380V ca y 72V cc |
| Pantógrafos por tren | 2 en coche remolque intermedio |
| Freno dinámico | Regenerativo y reostático |
| Freno neumático continuo | Aire comprimido |
| Control de freno neumático | Eléctrico+neumático |
| Freno de estacionamiento | Manual de usillo |
| Aparato de enganche | Schafenberg |
| Puertas de viajero con costado | 3x3 |
| Cabinas de conducción | 2 |
| Señalización de cabina | Asfa |
| calefacción | Eléctrica |
| Iluminación interior | Fluorescente y halógena |
| Plazas sentadas cocheM/R | 66/72 |
| Plazas totales coche M/R(sentadas+de pie) | 237/250 |

En la tabla 2.2 se observan los valores de las dimensiones características de un automotor eléctrico de la serie 446. Las dimensiones se muestran en milímetros.

Tabla 2.2. Dimensiones automotor eléctrico S-446 [2]

| | Coche Motor | Coche Remolque | Unidad |
|--|--------------------|-----------------------|---------------|
| Longitud entre enganches | 25 479 | 25 035 | 75 993 |
| Ancho exterior | 2 940 | 2 940 | - |
| Altura máxima sobre el carril | 4 185 | 4 185 | - |
| Distancia entre bogies | 17 400 | 17 775 | - |
| Empate de bogie | 2 500 | 2 500 | - |
| Diámetro de rueda nueva | 890 | 890 | - |
| Altura del piso sobre el carril | 1 150 | 1 150 | - |

En la tabla 2.3 se muestran los valores de los pesos en toneladas, de un automotor eléctrico de la serie 446.

Tabla 2.3. Pesos automotor eléctrico S-446 [2]

| | Coche Motor | Coche Remolque | Unidad |
|---------------------|--------------------|-----------------------|---------------|
| Cajas | 36.6 | 30.3 | 101.5 |
| Bogies | 25.6 | 13.9 | 65.1 |
| Tara | 61.2 | 44.2 | 166.6 |
| Carga Máxima | 17.3 | 18.4 | 63.0 |
| Peso máximo | 78.6 | 62.6 | 219.6 |

La distribución interior de los coches es la misma, salvo el espacio dedicado a la cabina de conducción de cada coche motor en donde se ubica el pupitre de mando, el panel superior de aparatos y armarios con el aparellaje de baja tensión, control de la climatización y los equipos de comunicación, información y seguridad. En el coche remolque sólo se sitúan dos armarios de aparatos de control.

El acceso se realiza por tres plataformas, provistas de puertas automáticas de doble hoja, de tipo encajable-deslizante, con paso libre de 1.3 metros, y estribos móviles, que proporcionan cuatro departamentos de viajeros con asientos fijos y abatibles y pasillo central. En los trenes de la 1ª y 2ª serie el accionamiento de las puertas era neumático, mientras que en el de la 3ª serie es eléctrico. En la figura 2.4 se muestra la distribución interior de un automotor eléctrico S-446.



Figura 2.4. Distribución interior S-446

El revestimiento interior de paredes y techo es en poliéster, siendo el piso de caucho. Los portaequipajes, barras asideros y papeleras complementan el interior.

El alumbrado es fluorescente por canal central con puntos de luz halógena en los laterales.

La UT dispone de teleindicadores en el interior de los vehículos y en el exterior, que ayudan al cliente a conocer el destino del tren, la próxima parada, las posibilidades de correspondencia con otros medios de transporte que tendrá en la próxima estación, y la temperatura exterior.

Además de esta información escrita, el viajero también puede recibir información por medio de la megafonía, bien digitalizada en el caso del anuncio automático de las estaciones, o bien producida por el propio maquinista si tiene que informar de alguna incidencia. Cuenta también con instalación para la emisión de música ambiental.

El sistema de climatización, tanto de calor como de frío, se integra en el techo de la plataforma central. Para reforzar la calefacción dispone de calentadores a nivel del piso.

2.1.2. Automotor eléctrico S-447

La serie 447, sucesora de la 446, mejora a esta por una mayor aceleración, un considerable aumento de la velocidad máxima, 120 km/h, una reducción del consumo energético, una considerable reducción de los costes de mantenimiento y un mayor confort de marcha. Esta serie es casi idéntica a su predecesora, con la que puede circular acoplada con mando múltiple. En la figura 2.5 se muestra un automotor eléctrico de la serie 447.



Figura 2.5. Automotor Eléctrico S-447

La serie 447 está concebida en tecnología de corriente trifásica, incorporándola por primera vez en España, como principales ventajas sobre su predecesora están:

- Mayor aceleración.
- Incremento de la velocidad máxima, que pasa a situarse en 120 km/h.
- Reducción del consumo energético por encima del 5 %.
- Reducción significativa del peso de la parte eléctrica.
- Un menor peso de los bogies, por la utilización de motores asíncronos trifásicos en lugar de motores de corriente continua.
- Reducción de los costes de mantenimiento.
- Mayor confort de marcha y mejor desgaste de la vía, por tener los accionamientos totalmente suspendidos.

En el pliego de concesiones del concurso se exigía, además, que la nueva unidad fuera compatible con las unidades de la serie 446 de tal forma que

podieran circular acopladas con mando múltiple entre ellas, naturalmente con las prestaciones de velocidad, tracción y freno del tren resultante son las que corresponden a la 446. Asimismo, que las diferencias en cuanto a caja del vehículo, interiorismo, pupitre de conducción y control fueran mínimas respecto a las unidades 446.

La concepción y desarrollo del proyecto técnico y constructivo de la serie 447 se realizó entre los años 1991 y 1992. En total, las 183 unidades que constituyen la serie fueron adjudicadas y construidas en cuatro lotes. En febrero de 1993, tras ocho meses de pruebas en vía, entró en servicio comercial en Valencia el primer tren de esta serie, que es a la vez el tren prototipo de los 71 que componían el lote inicial de trenes de la serie 447, adquiridos en abril de 1991.

El segundo lote (072 a 117) estuvo compuesto por 46 trenes y tiene como diferencia más significativa una distribución de asientos más clásica, por lo que aumenta el número de plazas sentadas y disminuye las de pie. Estas unidades se entregaron entre 1995 y 1996. Entre 1998 y 1999 se entregó el tercer lote compuesto por 20 unidades adquiridas en julio de 1997; mientras que las 46 unidades que componen el último lote fueron adquiridas en marzo de 1998. Los 183 trenes están circulando en las líneas de Cercanías de Madrid, Barcelona, Valencia y Murcia/Alicante .

Cada tren está formado por tres coches, dos motores en los extremos y uno remolque en el centro. Puede circular en acoplamiento múltiple hasta un total de 4 unidades.

En la figura 2.6 se puede observar el acoplamiento múltiple de 4 coches en un vehículo ferroviario.



Figura 2.6. Acoplamiento Múltiple

Estos trenes, concebidos y diseñados por CAF en su parte mecánica y equipos auxiliares, y por Siemens en la parte del equipo eléctrico de potencia y control, han sido construidos por ADtranz, actualmente Bombardier, CAF y Siemens.

En la tabla 2.4, se incluyen las especificaciones técnicas del automotor eléctrico de la serie 447.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del automotor eléctrico S-446 [2]

| | |
|--|--------------------------------|
| Composición | M-R-M |
| Ancho de vía | 1 668 mm |
| Tensión de alimentación | 3 000 Vcc |
| Composición múltiple | Hasta 3 unidades de tren |
| Potencia en régimen continuo | 2 400 Kw |
| Motores | 8 de cc de 320 Kw |
| Tipo de motor | Asíncrono trifásico |
| Esfuerzo tractor máximo en llantas | 195 KN |
| Esfuerzo tractor máximo en el arranque | 230 KN |
| Esfuerzo tractor a la velocidad máxima | 58 KN |
| Velocidad máxima | 120 Km/h |
| Aceleración en arranque | 1m/s ² |
| Aceleración entre 0 y 60 Km/h | 0.75 m/s ² |
| Aceleración entre 0 y 100 Km/h | 0.60 m/s ² |
| Deceleración normal | 1.0 m/s ² |
| Deceleración freno eléctrico | 1.0 m/s ² |
| Deceleración máxima de emergencia | 1.2m/s ² |
| Arranque en rampa | 35 m/s ² |
| Alimentación de auxiliares | 2 convertidores estáticos |
| Entrada energía al convertidor | 3 000Vcc |
| Salida energía a auxiliares | 380V ca y 72V cc |
| Pantógrafos por tren | 2 en coche remolque intermedio |
| Freno dinámico | Regenerativo y reostático |
| Freno neumático continuo | Aire comprimido |
| Control de freno neumático | Eléctrico+neumático |
| Freno de estacionamiento | Manual de husillo |
| Aparato de enganche | Schafenberg |
| Puertas de viajero con costado | 3x3 |
| Cabinas de conducción | 2 |
| Señalización de cabina | Asfa |
| calefacción | Eléctrica |
| Iluminación interior | Fluorescente y halógena |
| Plazas sentadas cocheM/R | 90/90 |
| Plazas totales coche M/R(sentadas+de pie) | 702/661 |

En la tabla 2.5 se observan las dimensiones más características de un automotor eléctrico de la serie 447. Las dimensiones se muestran en milímetros.

Tabla 2.5. Dimensiones automotor eléctrico S-447 [2]

| | Coche Motor | Coche Remolque | Unidad |
|--|--------------------|-----------------------|---------------|
| Longitud entre enganches | 25 479 | 25 035 | 75 993 |
| Ancho exterior | 2 900 | 2 900 | 2 900 |
| Altura máxima sobre el carril | 4 185 | 4 185 | 4 185 |
| Distancia entre bogies | 17 400 | 17 775 | - |
| Empate de bogie | 2 500 | 2 500 | - |
| Diámetro de rueda nueva | 890 | 890 | - |
| Altura del piso sobre el carril | 1 150 | 1 150 | - |

La tabla 2.6 indica los valores de los pesos de un vehículo automotor eléctrico de la serie 447. Las dimensiones se muestran en toneladas.

Tabla 2.6. Pesos del automotor eléctrico S-447[2]

| | Coche Motor | Coche Remolque | Unidad |
|---|--------------------|-----------------------|---------------|
| Cajas | 37.5 | 32.3 | 107.3 |
| Bogies | 21.0 | 13.2 | 66.2 |
| Tara | 58.5 | 45.5 | 162.6 |
| Carga máxima (1º,3º y 4º lote / 2º lote) | 17.3 / 16.61 | 18.4 | 53.6 / 51.6 |
| Peso máximo (1º,3º y 4º lote / 2º lote) | 75.8 / 75.1 | 64.5 / 63.8 | 216.1 / 214.1 |

El acceso a los vehículos es facilitado por los estribos móviles que montan las tres puertas de acceso a cada uno de los vehículos que forman la composición. Las puertas dan acceso a las plataformas que están integradas en la sala de viajeros. La sala de viajeros es diáfana aunque los asientos y el mobiliario se agrupan formando cuatro subdivisiones, en torno al pasillo y a los accesos. Las unidades de la número 72 a la 117 cuentan con una disposición de asientos diferente, en filas de 2 por 2.

Asimismo cuenta con 12 estrapontines por coche, lo que aumenta en 36 en número de plazas sentadas de la unidad. En la figura 2.7 se muestra el interior de un vehículo de la serie 447.



Figura 2.7. Distribución interna automotor eléctricoS-447

Los teleindicadores interiores informan al viajero de la estación de destino, el itinerario, las conexiones de cada estación, la hora y la temperatura exterior.

Por su parte, los teleindicadores exteriores de destino están controlados digitalmente desde el pupitre de conducción. En los departamentos se anuncian las estaciones tanto visual como acústicamente a través de la megafonía, la cual puede emitir anuncios grabados desde la cabina, o a través del tren tierra o por el propio maquinista. La megafonía también emite música ambiental, emitida a través de un CD.

Por último señalar que la unidad cuenta con sistema de radiocomunicación tren tierra, Asfa, y “hombre muerto” de doble efecto. Dispone también de una central de información para indicar al maquinista de cualquier incidencia o avería y la forma de actuar.

2.2. Elementos de un vehículo ferroviario

Se toma como modelo el bogie de de un vehículo de pasajeros perteneciente a la flota de vehículos de la empresa Renfe cercanías. Cada vehículo ferroviario está compuesto por tres coches: dos coches motores en los extremos y un coche remolque intermedio.

Cada coche posee dos bogies, cada uno de los cuales se encuentra apoyado sobre dos conjuntos eje-rueda; por tanto, cada coche posee una suspensión de dos etapas: primaria y secundaria. La suspensión primaria se encuentra entre el conjunto eje-rueda y el bogie; la suspensión secundaria se encuentra entre el bogie y la caja de pasajeros.

Los coches motores, los que dan tracción al vehículo, son denominados locomotoras. La parte mecánica de una locomotora se compone de:

- Caja.
- Cabezal fijo.
- Sistema rodante.

El tren de rodadura se compone de los ejes que soportan el chasis y lo guían por la vía, más un sistema de suspensión apropiado.

El motor se puede colocar de dos maneras:

- Semi-suspendido, de manera que el motor repose sobre tres puntos: dos de ellos directamente sobre el eje, por medio de cojinetes, y el tercer punto sobre el bastidor del bogie.
- Suspendido, en el bastidor de los bogies, solidario a la parte suspendida de la locomotora. El par del motor se transmite a través de una rueda dentada calada al eje o un piñón de ataque solidario del motor.

En las siguientes secciones se muestran, en detalle, los elementos de un vehículo ferroviario.

2.2.1 Caja

La estructura de las cajas es autoportante, formada por perfiles laminados y chapas de acero y cobre soldados eléctricamente al arco. Sobre esta estructura van soldados los subconjuntos de chapa que forman las paredes laterales, de chapa tensada para evitar irregularidades, los testeros y el techo. Aunque se intentó desde el principio que las cajas fueran de aluminio, no fue posible por no disponerse de la tecnología adecuada [2].

La parte frontal del vehículo, los testeros, son de poliéster de gran resistencia sujetos a la estructura con remaches tubulares, pegamento y selladora, diseñados para absorber energía en caso de impacto frontal. Una gran luna blindada anti-impacto proporciona al maquinista visibilidad y protección. En la figura 2.8 se puede ver el frontal de la caja de un vehículo tractor.



Figura 2.8. Caja vehículo serie 447

Los costados del tren, ligeramente inclinados en la vertical, llevan ventanas fijas de vidrio reflectante dispuestas en forma de banda continua. Cada ventana tiene, por la parte interior, un segundo vidrio y todos son blindados. Asimismo cuenta con faldones longitudinales de fibra de vidrio que ocultan los aparatos del interior. Bajo las puertas existen unos estribos móviles que se desplazan hacia el exterior a la vez que se abren las puertas.

Todos los coches están intercomunicados mediante puertas de accionamiento manual y túneles de goma. La distribución interior de los coches es igual, salvo el espacio dedicado a la cabina de conducción de cada coche motor [2].

Para el acceso de los viajeros, cada coche cuenta con tres plataformas. Cada plataforma está compuesta por dos puertas, de dos hojas encajables

deslizantes de 1.300 mm de paso libre con estribos deslizantes retráctiles cada una-. Estas tres plataformas de entrada y salida al coche configuran cuatro departamentos de viajeros con asientos fijos y abatibles y pasillo central. La altura del piso es relativamente bajo (1.150 mm) y uniforme en todo el tren.

Bajo el bastidor de los coches motores se encuentran, entre otros elementos, el cofre del chopper, reactancias, convertidor estático, y el cofre inversor, mientras que en el del coche remolque están los disyuntores, los seccionadores, el compresor, el secador, paneles neumáticos y una unidad condensadora de climatización. En el techo de cada coche se sitúan las resistencias de frenado y en el del remolque los dos pantógrafos y el pararrayos.

La unión entre los diferentes coches se puede llevar a cabo de varias formas. Las uniones más comunes son acoples de tope y cadena, de eslabón y perno, o automáticos. Dentro de los acoples de tipo automático, podemos diferenciar entre los acoples Janney y los Scharfenberg. El acople de tipo Janney se utiliza para transporte de gran tonelaje. El acople de tipo Scharfenberg es el que usan los trenes de Renfe que son objeto de nuestro estudio, permiten conectar los sistemas eléctrico y neumático [4].

La figura 2.9 muestra un ejemplo de la unión mediante acople de tope y cadena (izquierda) y de acople de eslabón y perno (derecha).



Figura 2.9. Acople de tope y cadena (izquierda) y acople de eslabón y perno (derecha)

En la figura 2.10 se muestran los acople de Scharfenberg (izquierda) y Janney (derecha).



Figura 2.10. Acoples automáticos de Scharfenberg (izquierda) y Janney (derecha)

2.2.2 Equipo eléctrico de potencia y control

El equipo de potencia y control está constituido por dos circuitos de tracción y freno eléctrico, idénticos pero de funcionamiento independiente, instalados cada uno de ellos en cada coche motor, excepto las partes comunes situadas en el coche remolque [2].

El equipo de captación de corriente, común para los dos equipos de potencia, está constituido por:

- Dos pantógrafos situados en el coche intermedio que captan la alimentación eléctrica de la catenaria en corriente continua a 3.000 kV.
- Un disyuntor general y dos de freno eléctrico.
- Dos pararrayos.
- Dos juegos de seccionadores.

El equipo de tracción, situado en cada uno de los dos coches motores, va dotado de tecnología chopper. Cada equipo de potencia y control de cada coche motor está básicamente integrado por:

- Un chopper principal, formado a su vez por dos chopper bifásicos tipo AVF de funcionamiento entrelazado y desfasados 180°. El chopper bifásico trabaja con frecuencias de 300 Hz. que en arranque son de 75, 150 y 300 Hz.
- Un chopper de freno eléctrico reostático (600 Hz.) que trabaja cuando la línea catenaria no admite recuperación de energía.

- Cuatro motores de tracción de corriente continua y potencia nominal de 300 Kw. Estos motores atacan cada uno de los ejes del coche motor por un acoplamiento elástico de doble engranaje tipo WN. En total la Unidad lleva 8 motores de tracción.
- Cuatro equipos de transmisión mecánica formados a su vez por un reductor y un acoplamiento elástico.

Estas unidades tienen la posibilidad de conducción por velocidad prefijada.

2.2.3 Sistemas de frenos

La unidad de tracción posee los siguientes sistemas de freno:

- Freno eléctrico de recuperación y/o reotipo 'blending', con preferencia del primero sobre el segundo.
- Freno de estacionamiento por muelle acumulador.

El freno de servicio es combinado, eléctrico y/o neumático y recupera energía en la medida en que la catenaria lo admita [2].

2.2.4 Equipos auxiliares y neumáticos

El equipo eléctrico auxiliar para el suministro del alumbrado, control de tracción, climatización y batería cuenta con dos convertidores estáticos a 3.000 Vcc, 85 KVA, salida a 380 Vca y 72 Vcc. En caso de avería un convertidor alimenta automáticamente la unidad con el 50 por ciento de climatización y alumbrado. Las prestaciones de la climatización son de 34.500 kcal/h en cada coche (22 kW) y de 34,5 kW por coche en calefacción.

La producción de aire se realiza mediante un compresor principal accionado por un motor de 12 kW con una capacidad de 1.400 litros/min. a 10 bar. El aire se almacena en depósitos con 200 litros y se emplea para el freno neumático de servicio, de urgencia, hombre muerto, suspensión neumática, apertura de puertas y servicios auxiliares. Tiene también un compresor auxiliar de 1 kW para subir el pantógrafo y accionar el disyuntor principal. [2]

2.2.5 Sistema rodante

La principal diferencia entre los vehículos ferroviarios y el resto de transportes terrestres es el sistema de guiado. La superficie de los carriles no sólo sirve de apoyo a las ruedas, sino que también las guía, determinando la dirección de desplazamiento del vehículo [5].

El sistema rodante es el sistema que desarrolla el correcto movimiento del vehículo a lo largo de las vías. El sistema lo componen las ruedas con sus cajas de grasa, la suspensión elástica, los frenos, la tracción y los dispositivos para transmitir las fuerzas de tracción y frenado al cuerpo del vehículo.

Sus principales funciones son:

- Transmisión y distribución de la carga vertical de las ruedas a los carriles.
- Guiado del vehículo a lo largo de la vía.
- Control de las fuerzas dinámicas debidas al movimiento por irregularidades del carril, en curva, agujas y después de impactos entre vehículos.
- Amortiguación eficaz de los movimientos oscilatorios.
- Aplicación de las fuerzas de tracción y frenado.

Dependiendo de su mecanismo de rodadura, podemos diferenciar entre vehículos provistos de bogies y aquellos que no están provistos de bogies. En vehículos sin bogies, tanto la suspensión como los frenos y los equipos de tracción se montan sobre el bastidor del vehículo. Las fuerzas de tracción y frenado son transmitidas a través de barras de tracción.

Si se trata de vehículos convencionales de dos ejes, se generarán mayores esfuerzos en curvas que en los vehículos equivalentes con bogies, de manera que los vehículos con bogies pueden ser más largos y pueden describir curvas más cerradas que los vehículos de ejes simples.

En la figura 2.11 se puede ver una comparación entre el vehículo de ejes simples y el equipado con bogies en paso por curva.

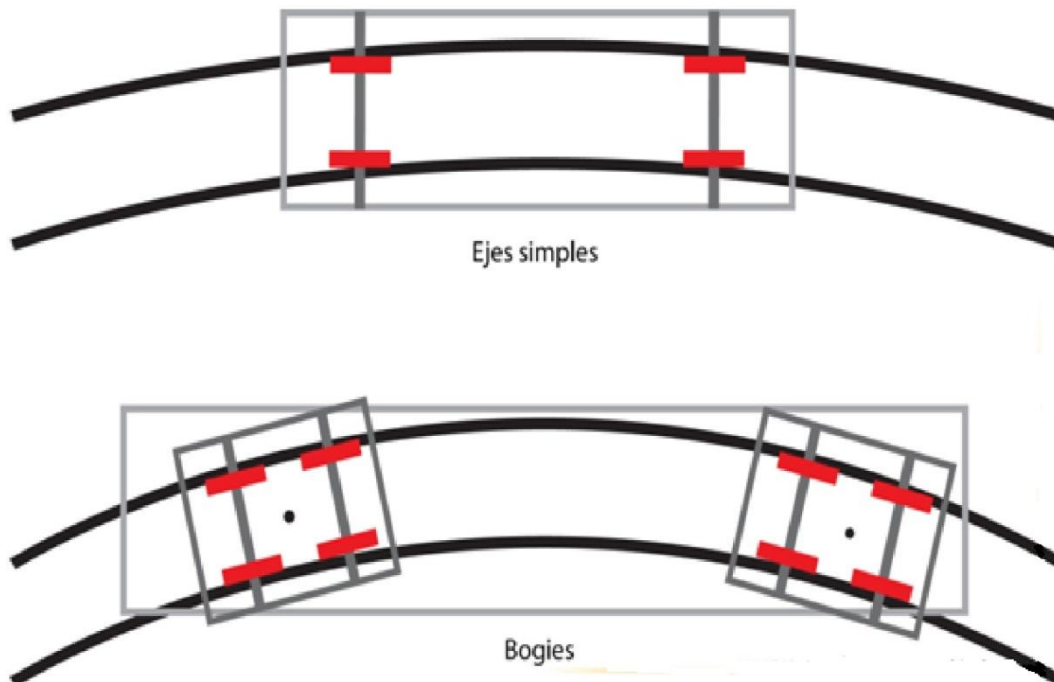


Figura 2.11. Comparación entre ejes simples y bogies en paso por curva

2.2.6. Bogies

El bogie es un tren de rodaje montado en una estructura independiente que puede girar con respecto al cuerpo del vehículo. Comúnmente, los bogies poseen dos ejes, pero a menudo encontramos también bogies de tres y cuatro ejes, sobre todo en locomotoras.

Antiguamente, los bogies simplemente permitían el movimiento del tren de rodaje en un plano horizontal respecto al cuerpo del vehículo y con ello los juegos de ruedas presentaban ángulos de ataque menores en las alineaciones curvas. Los bogies modernos tienen una estructura que les permite transmitir todos los esfuerzos longitudinales, horizontales y verticales desde el cuerpo del vehículo a las ruedas.

Esta estructura o bastidor está equipada además con los dispositivos de frenado, tracción, suspensión y amortiguación; y en ella se pueden instalar también elementos de control de inclinación, de lubricación del contacto rueda carril y mecanismos para facilitar el posicionamiento radial de las ruedas en las curvas.

En la Figura 2.12, se muestra la diferencia entre un bogie de eje simple y uno de dos ejes a la hora de vencer las irregularidades del terreno.

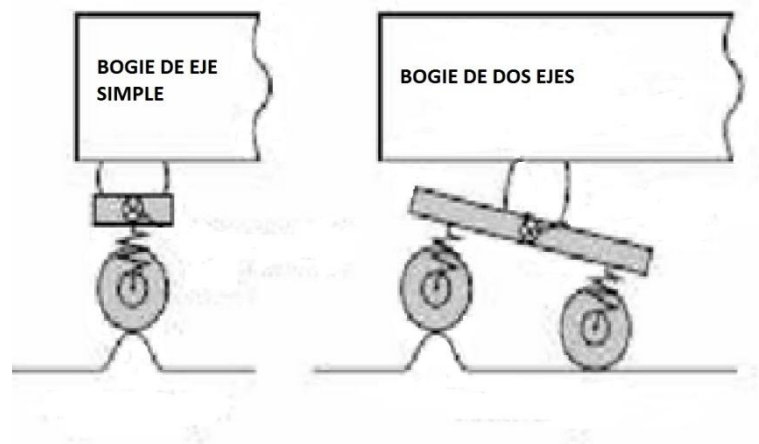


Figura 2.12. Comparación del efecto de irregularidades en la vía entre un bogie de ejes simples y un bogie de dos ejes [5]

A continuación se exponen los diferentes elementos que componen un bogie.

2.2.6.1. Juegos de ruedas

Un juego de ruedas se compone de dos ruedas rígidamente conectadas por un eje. El juego de ruedas está apoyado sobre cojinetes montados en el eje. Podemos resumir sus principales funciones y características en las citadas a continuación:

- Mantener la distancia necesaria entre el vehículo y la vía.
- Proporcionar el guiado que determina el movimiento dentro del ancho de vía, incluso en curvas y agujas.
- Transmisión de la tracción y las fuerzas de frenado a los carriles para acelerar y decelerar el vehículo.

El diseño del juego de ruedas depende de:

- El tipo de vehículo (de tracción o remolcado).
- El tipo de sistema de frenos utilizado (zapata, freno de disco en el eje, o freno de disco en la rueda).
- La posición de los cojinetes en el eje (por dentro o por fuera).

- El interés de limitar las fuerzas de alta frecuencia mediante el uso de elementos resistentes entre el centro de la rueda y la llanta.

A pesar de la variedad de diseños, todos estos juegos de ruedas tienen dos características comunes: la conexión rígida entre las ruedas a través del eje y el perfil transversal de la superficie rodante de la rueda, llamado perfil de la rueda [5].

Los principales tipos de diseño de juegos de ruedas se muestran a continuación. En la figura 2.13 se muestra los juegos de ruedas con cojinetes internos y externos.

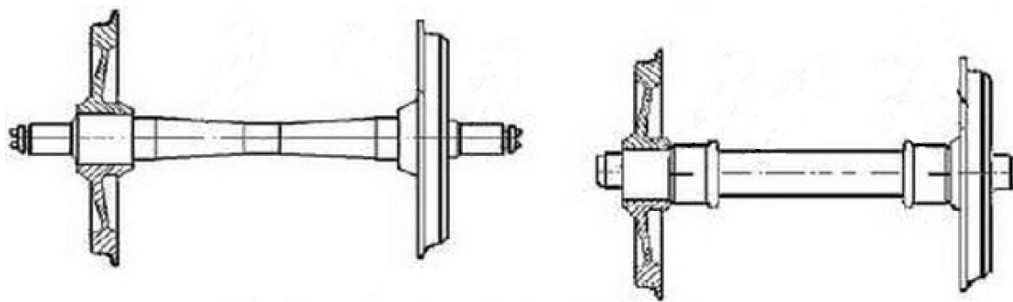


Figura 2.13. Juegos de ruedas con cojinetes internos y externos

En la figura 2.14 se muestra los juegos de ruedas con discos de freno en el eje en la rueda.

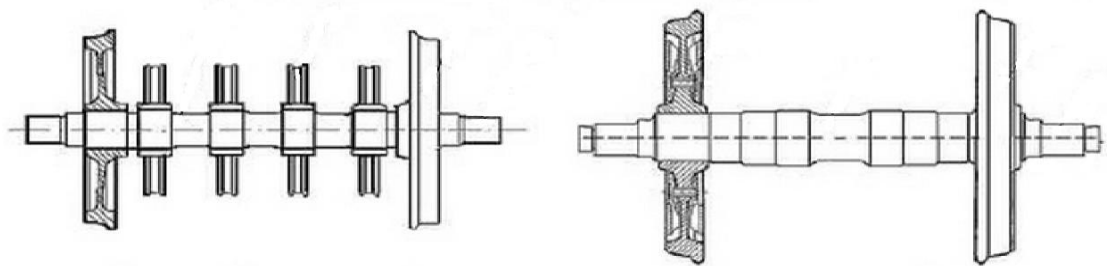


Figura 2.14. Los juegos de ruedas con discos de freno en el eje en la rueda [5]

En la figura 2.15 se muestra los juegos de ruedas de material rodante de tracción con posición de engranajes asimétrica y simétrica.

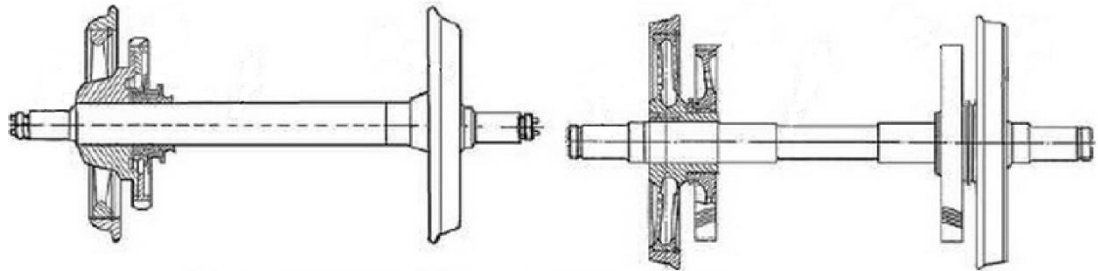


Figura 2.15. Juegos de ruedas de material rodante de tracción con posición de engranajes asimétrica y simétrica [5]

Para complementar el concepto general de juego de ruedas, se incluye como nota aclaratoria la figura 2.16, un esquema básico del juego de ruedas y el eje montado sobre la vía.

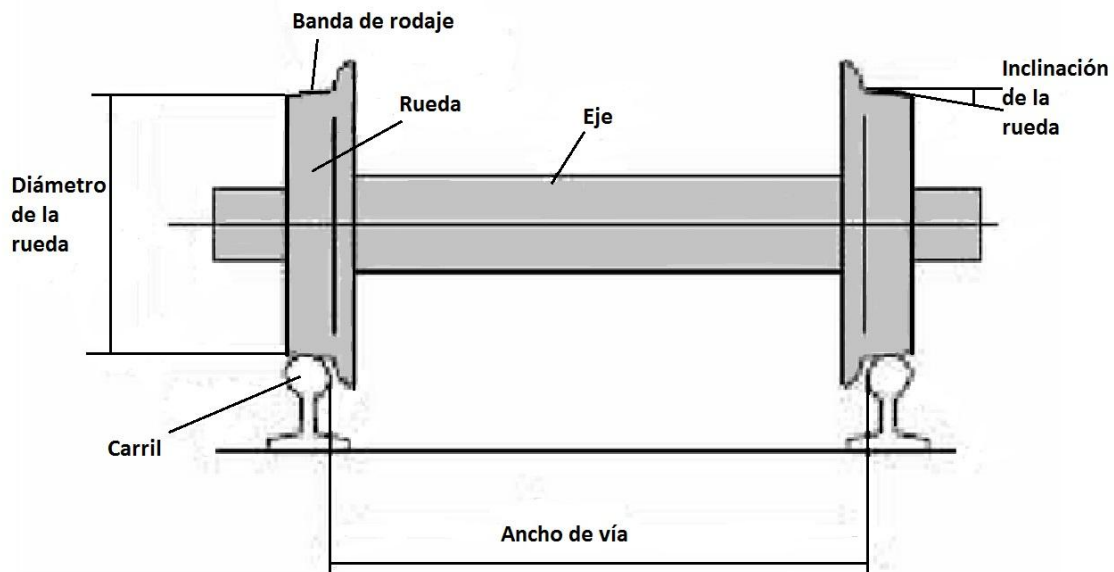


Figura 2.16. Conjunto de juego de ruedas y eje sobre la vía

2.2.6.2 Cajas de grasa

La caja de grasa es el dispositivo que permite que el juego de ruedas pueda girar, ya que proporciona el alojamiento del cojinete y, al mismo tiempo, los soportes para que la suspensión primaria sujete el juego de ruedas al chasis del vehículo. La caja de grasa transmite las fuerzas longitudinales, laterales y verticales desde el juego de ruedas a los demás elementos del bogie [5].

En la figura 2.17 se muestra un ejemplo del montaje de una caja de grasa en un vehículo ferroviario.

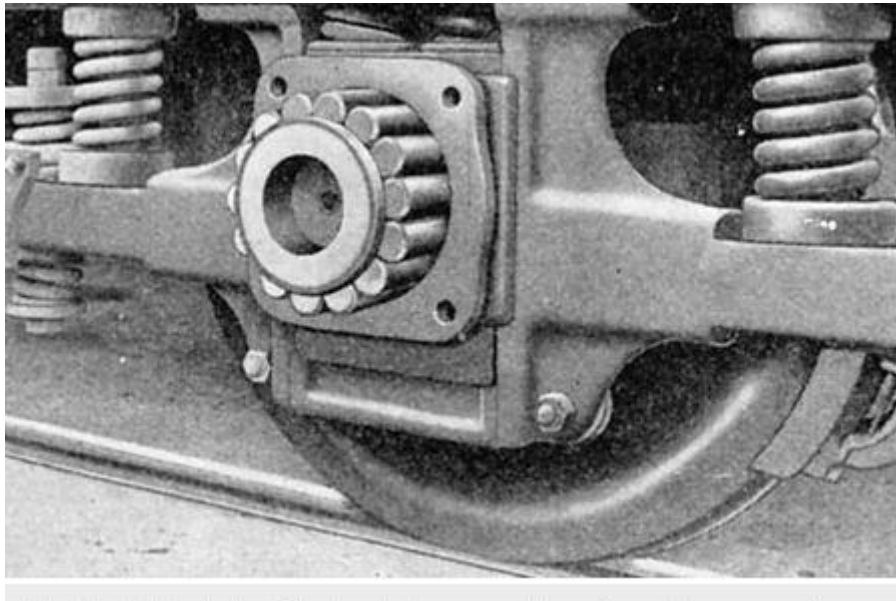


Figura 2.17Caja de grasa para ferrocarriles [6]

Las cajas de grasa se clasifican de acuerdo con:

- Su posición sobre el eje, dependiendo de si los cojinetes están dentro o fuera.
- El tipo de cojinete utilizado, que puede ser rodamiento de rodillos o de fricción.

La forma externa de la caja de grasa se determina por el método de conexión entre la caja del eje y el bastidor del bogie y su objetivo es lograr una distribución uniforme de las fuerzas en el cojinete. La construcción interna de la caja del eje está determinada por el cojinete y su método de sellado.

En la figura 2.18 podemos observar un esquema de una caja de eje con cojinete de fricción. Este tipo de cajas de eje tienen como componentes la carcasa (1), el propio cojinete (2) que generalmente está hecho de aleación con bajo coeficiente de fricción, el cojinete (3) que transmite las fuerzas desde la carcasa de la caja del eje hasta el cojinete, un dispositivo de lubricación (4) que engrasa el eje del cojinete. Sellado delantero y trasero (5 y 6) para evitar que entre suciedad o cuerpos extraños en la caja del eje, el sellado delantero (6) se puede retirar para comprobar el estado de los rodamientos y añadir lubricante.

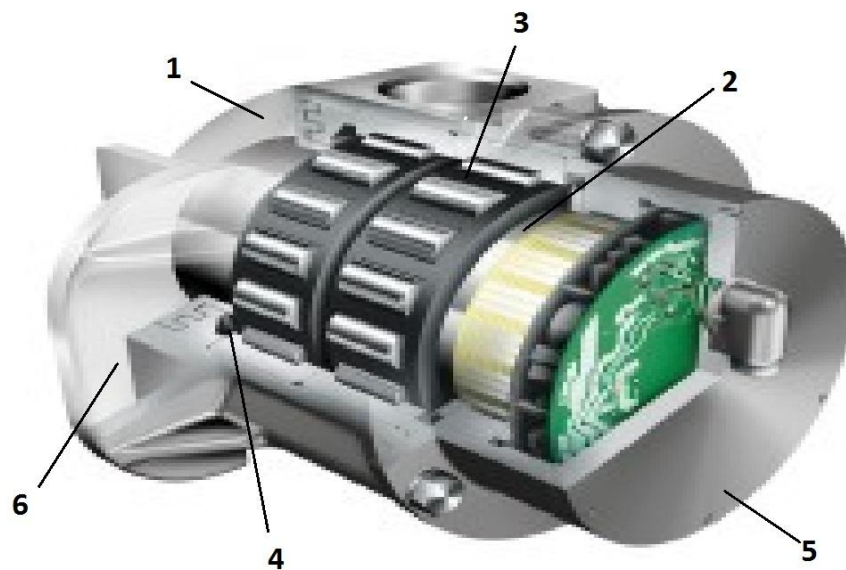


Figura 2.18. Partes de la caja de grasa

Las fuerzas verticales y longitudinales se transmiten a través de la superficie interna del cojinete y las fuerzas laterales por sus caras.

Este tipo de cajas de eje de cojinete de fricción se han quedado hoy en día obsoletas ya que presentan varias desventajas importantes, en primer lugar, poseen un elevado coeficiente de fricción cuando comienzan a trabajar desde el reposo, poca fiabilidad, además necesitan un mantenimiento intensivo, contaminan el medio ambiente, etc.

En la figura 2.19 se pueden observar varios tipos de cajas de eje con cojinetes de rodamientos de rodillo. Este tipo de cojinetes se clasifican de acuerdo con:

- El tipo de rodamiento (cilíndrico, cónico, esférico).
- El método de ajuste (ajuste de presión, ajuste por contracción, ajuste por cojinete o de tapón).

El factor principal que determina la construcción de la caja del eje es la forma en que experimenta las fuerzas axiales y distribuye la carga entre los rodillos.

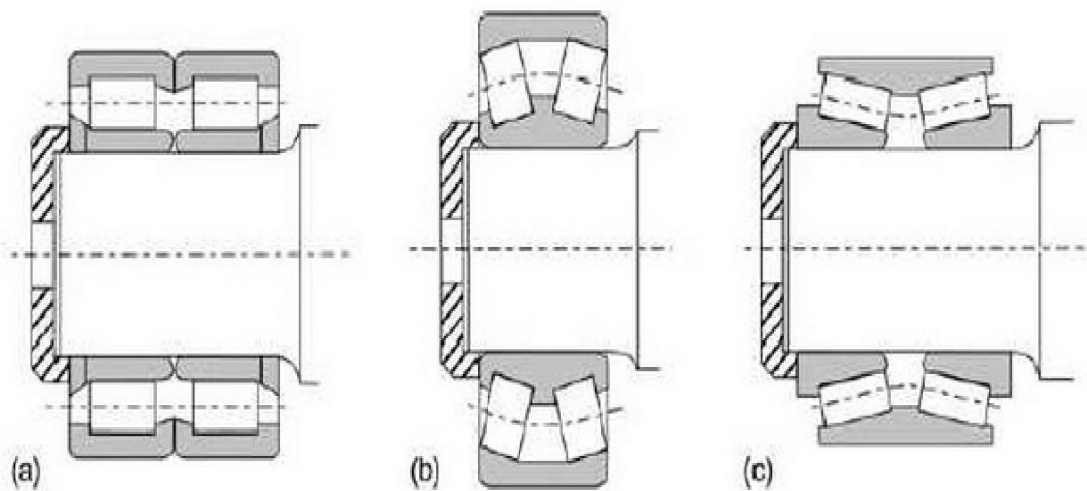


Figura 2.19. Diseños de rodamientos de rodillos: (a) cilindro de dos hileras (b) autoalineado de una hilera (c) cónico de dos hileras [5]

Los rodamientos de rodillos cilíndricos (a) tienen una gran capacidad dinámica en la dirección radial pero no para transmitir fuerzas axiales.

Los rodamientos de rodillos cónicos (b) y (c) transmiten las fuerzas axiales a través de la superficie cilíndrica debido a la inclinación de su eje de rotación. Aunque también presentan ciertos inconvenientes, este tipo de rodamientos son los más utilizados hoy en día.

Los rodamientos de rodillos esféricos no son muy utilizados debido a su alto coste y su baja capacidad de carga, sin embargo presentan una importante ventaja respecto al resto en cuanto a una mejor distribución de la fuerza delantera y trasera.

Los rodamientos de bolas son a menudo combinados con los rodamientos cilíndricos para transmitir fuerzas axiales. El material rodante de alta velocidad suele estar provisto de tres tipos de rodamientos en la caja de grasa: dos para

transmitir las fuerzas radiales y otro (generalmente un rodamiento de bolas) para trabajar axialmente.

En la Figura 2.20 se presentan dos tipos de caja de grasa de alta velocidad.

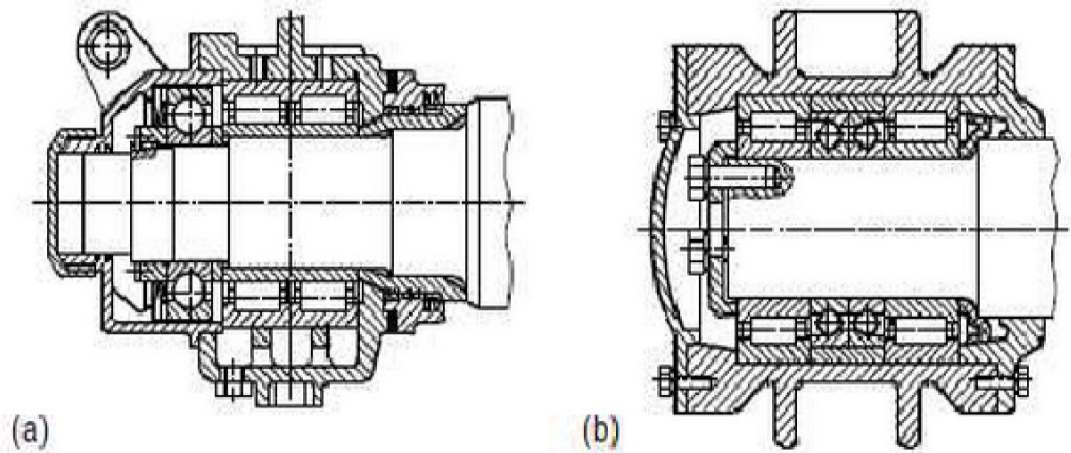


Figura 2.20. Cajas de grasa de alta velocidad (a) triple rodamiento en trenes de alta velocidad japoneses (b) triple rodamiento en trenes de alta velocidad franceses

2.2.6.3 Ruedas

Las ruedas y los ejes son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Su fallo mecánico o su sobredimensionado, pueden causar el descarrilamiento. Las ruedas se clasifican en macizas, con llantas y ensambladas.

Las ruedas macizas tienen tres elementos principales: la llanta, el disco y el eje, y comúnmente difieren en la forma del disco, que puede ser recto, cónico, en forma de S, con radios o corrugado.

Las ruedas con llantas se equipan con una llanta ajustada al disco de la rueda que puede ser reemplazada cuando alcanza su límite máximo de rodaje.

Con el objeto de reducir las fuerzas de interacción rueda – carril, se han desarrollado ruedas ensambladas con componentes flexibles, que incorporan una capa de material con bajo módulo de elasticidad (goma, poliuretano). Esto ayuda a atenuar la actuación de las fuerzas de alta frecuencia en el contacto rueda – carril.

En la figura 2.21 se muestra en detalle de una rueda ferroviaria sobre la vía.



Figura 2.21. Fotografía de una rueda ferroviaria

2.2.6.4 Suspensión

El sistema de suspensión de un vehículo es el encargado de soportar el peso del vehículo, permitiendo además su movimiento elástico controlado sobre sus ejes. Este sistema permite absorber la energía producida por las irregularidades de la vía para mantener la estabilidad del vehículo, proporcionando mayor confort y seguridad a sus pasajeros.

El sistema de suspensión debe garantizar la protección de los componentes del vehículo, cualesquiera que sean el estado de la vía y las condiciones de utilización. La estabilidad del vehículo debe cumplirse pese a los obstáculos, los desniveles de la ruta, el radio de viraje y la pendiente. También debe garantizarse la comodidad de los pasajeros y la protección de las mercancías transportadas, reduciendo en cuanto sea posible los movimientos verticales, longitudinales, transversales y angulares de la parte suspendida del vehículo.

El sistema de suspensión suele estar ubicado entre el suelo y el bastidor, y está constituido genéricamente por los mismos componentes para todo tipo de vehículos, diferenciándose en sus tipos y dimensiones de acuerdo a las prestaciones del vehículo y su función.

La suspensión constituye un aspecto fundamental en el diseño mecánico de cualquier vehículo. En la mayor parte de los vehículos, el diseño de la suspensión afecta también a otras prestaciones del mismo. Así, en los vehículos ferroviarios el diseño de la suspensión influye sobre la estabilidad

estática y dinámica y sobre los esfuerzos rueda-carril, tanto en circulación en curvas como por tramos rectos.

Como consecuencia de su influencia sobre otras prestaciones del vehículo, el diseño de una suspensión no puede realizarse atendiendo exclusivamente a uno de los aspectos afectados por ella, por tanto, no es de extrañar que generalmente las soluciones alcanzadas solo constituyan un compromiso que más o menos tiene en cuenta los imperativos a satisfacer. Todo ello confiere al diseño de la suspensión una gran complejidad y requiere la participación de personas con muchos años de experiencia [7].

En la suspensión de un vehículo existen diferentes tipos de elementos que permiten asegurar las funciones de confort, estabilidad, seguridad y calidad de marcha. De forma general, estos elementos pueden dividirse en elementos elásticos y elementos amortiguadores.

Los primeros garantizan la unión entre los órganos de rodadura y el vehículo, aportando una fuerza recuperadora cuando se produce alguna separación entre ellos. Los segundos son elementos disipadores de energía que hacen que decaiga el movimiento oscilatorio provocado por cualquier tipo de perturbación que actúe sobre la suspensión.

Dependiendo del sistema de suspensión utilizado, algunos elementos cumplen la doble función de ser elementos elásticos y de amortiguamiento.

Si se considera un vehículo desplazándose sobre un terreno horizontal, la situación ideal sería la que permitiera avanzar sobre la superficie de dicho terreno sin que provocase ninguna oscilación de la caja del vehículo. Ahora bien, si existe una unión entre las ruedas y la caja del vehículo, cualquier irregularidad del terreno se transmitirá en cierta forma a la caja y alterará el movimiento de la misma. Dicha unión es, por otra parte, necesaria si se desea que el vehículo y ruedas sigan un recorrido común. Como consecuencia, la transmisión de vibraciones a la caja en algún grado resulta inevitable.

Existen diferentes formas de conseguir la rigidez y amortiguamiento requeridos en una suspensión. Desde la aparición de los primeros vehículos han sido muchos los elementos utilizados para ello.

Para la comprensión de los apartados siguientes, se tiene que mencionar que cualquier tipo de vehículo consta de las partes:

- una parte llamada **masa suspendida**, que es la parte de la masa total que es soportada por el sistema de suspensión. Está constituida por chasis, grupo motor, carrocería etc. además de la carga del vehículo;
- una parte llamada **masa no suspendida**, formada por el sistema de suspensión y los elementos que conectan dicho sistema con la vía sobre la que circula el vehículo, como son ejes, ruedas, frenos del vehículo si están incluidos fuera del chasis, elementos de transmisión etc.

A continuación se exponen los elementos generales constituyentes de una suspensión en vehículos ferroviarios, sus características y funciones.

a) Resortes helicoidales

Los resortes helicoidales son probablemente los elementos de rigidez más utilizados en las suspensiones de vehículos. Normalmente se utilizan trabajando a compresión y se fabrican a partir de varillas y/o barras de acero de alta resistencia. Su tensión inicial es obtenida, durante el arrollamiento en frío, por una deformación permanente. En algunos vehículos, en especial en suspensiones ferroviarias, es habitual emplear resortes montados concéntricamente uno dentro de otro. Este montaje es equivalente a dos resortes en paralelo, y aumenta la resistencia elástica que es capaz de soportar el resorte aislado. En la figura 2.22 se muestra un resorte helicoidal.



Figura 2.22. Resorte helicoidal

b) Barras de torsión

Las barras de torsión son dispositivos que, debido al ablandamiento de la suspensión vertical, se van incorporando a la suspensión de un gran número de vehículos ferroviarios.

En la figura 2.23 mostrada a continuación se puede ver el esquema de una barra de torsión.



Figura 2.23. Barra de torsión

Su misión consiste en disminuir el ángulo de balanceo experimentado por el vehículo en su paso por curva. Dicho ángulo, además de provocar una mayor fuerza lateral sobre los viajeros, provoca un desplazamiento lateral del centro de gravedad, que tiende a reducir la carga en las ruedas interiores y a aumentarla en las exteriores, lo que incrementa el riesgo de vuelco del vehículo.

En el caso de vehículos ferroviarios, la reducción de la fuerza lateral experimentada por los viajeros permite incrementar la velocidad de paso por las curvas, manteniendo el confort.

c) Ballestas

La ballesta o, también conocida como resorte de láminas, es uno de los componentes de suspensión más antiguo y que todavía perdura debido a múltiples ventajas, como son su bajo coste, su capacidad para soportar grandes cargas y su amortiguamiento propio, además de realizar funciones adicionales de guiado lateral y longitudinal.

Este tipo de resorte está formado por una serie de láminas de acero superpuestas. Se muestra un ejemplo de ballesta en la figura 2.24.

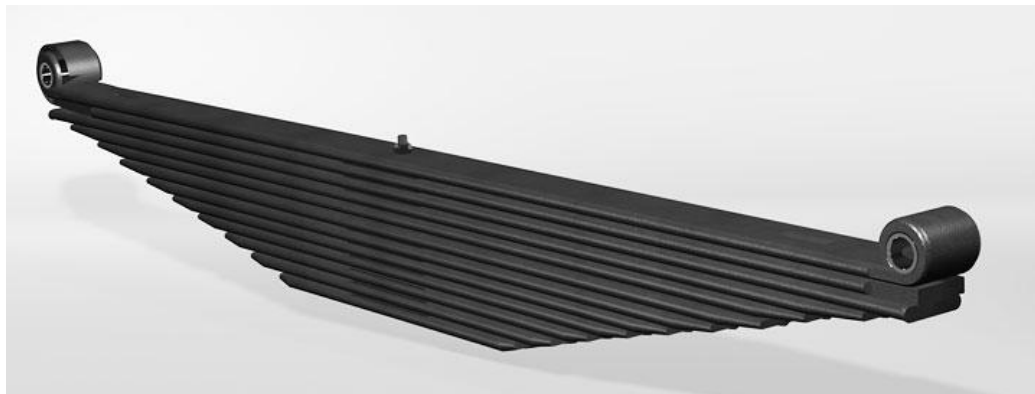


Figura 2.24. Ballesta

La lámina principal, la más larga, se llama lámina u hoja maestra, terminando generalmente en uno o dos arrollamientos para formar un ojo que sirve para su fijación. A veces la lámina maestra está sostenida, hasta debajo de los puntos de apoyo, por una segunda lámina, que entonces se llama lámina sub-maestra.

Las otras láminas o láminas de sostén son de longitudes desiguales, llamándose a la parte no sostenida de una lámina el escalonado. Las láminas están ensambladas entre sí por un bulón central o capuchino. Las láminas generalmente son de anchura y grueso constante; sin embargo, la lámina maestra a veces es de mayor grosor que las otras, al tener que resistir esfuerzos de todas clases como consecuencia de los movimientos verticales, longitudinales y transversales de la parte suspendida con respecto a la no suspendida.

Los extremos de las láminas de sostén son rectangulares o de forma trapezoidal o parabólica y a veces, progresivamente, adelgazadas en la longitud de la parte escalonada.

La curvatura de las láminas crece a medida que la longitud disminuye, a fin de evitar divergencias entre los extremos de cada una de ellas. La diferencia de curvatura, sin embargo, no debe ser exagerada a fin de evitar fatigas excesivas en las láminas más alejadas de las maestras.

En la figura 2.25 se puede ver el montaje de una ballesta en un bogie.



Figura 2.25. Fotografía del montaje de ballesta en un bogie

El desplazamiento lateral de las láminas entre sí es impedido mediante bridas o abrazaderas, estando guiado el deslizamiento de las láminas de sostén, debido a la modificación de la flecha por nervaduras o tetones centrales.

En vehículos ferroviarios las ballestas se utilizan en trenes de mercancías debido a su gran capacidad de carga. En este caso el montaje se realiza mediante dos anillas, colocadas cada una en un extremo.

Se suelen utilizar ballestas de doble flexibilidad, en las que parte de las hojas comienzan a deformarse a partir de una determinada carga. De esta forma, se consigue que la frecuencia natural de la suspensión no cambie demasiado entre las condiciones de tara y carga máxima y, por otra parte, en vehículos ferroviarios se asegura una deformación elevada hasta descarga completa de ruedas, lo cual es una condición necesaria para evitar riesgos de descarrilamiento.

En la figura 2.26 se observan las ballestas como parte del sistema de suspensión de un vehículo ferroviario.

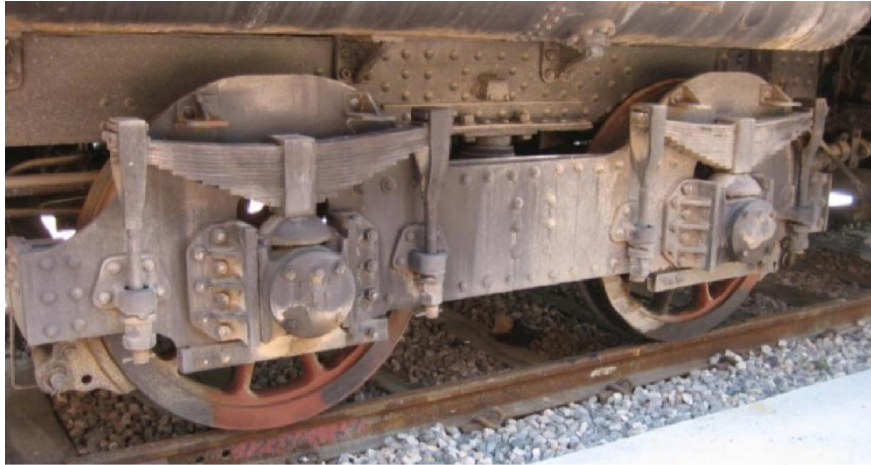


Figura 2.26 Fotografía del montaje de ballesta en un bogie

d) Resortes de caucho-metal

La utilización de resortes caucho-metal resulta muy frecuente como suspensiones de maquinaria, motores etc., en las que es necesario filtrar vibraciones de alta frecuencia asociadas con desplazamientos relativamente pequeños. La mejora de la tecnología de producción de estos elementos ha facilitado su utilización en suspensiones de vehículos. Fundamentalmente sus aplicaciones se centran en vehículos ferroviarios, o como elementos accesorios de las suspensiones principales de los automóviles. En la figura 2.27 se muestra una suspensión caucho-metal utilizada en la suspensión primaria de algunas unidades de metro.

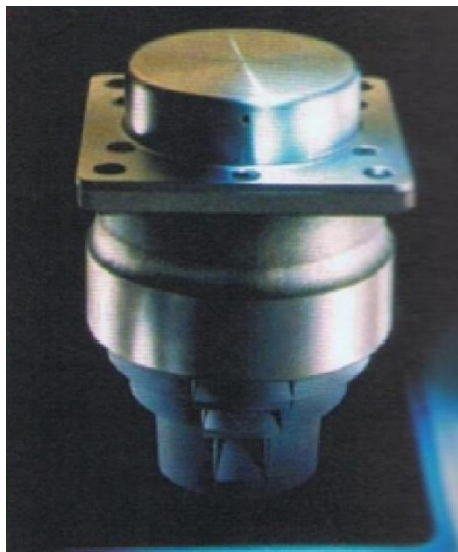


Figura 2.27. Resorte caucho-metal

Debido a la complejidad de las formas geométricas empleadas y al comportamiento no lineal del conjunto (material no lineal, grandes deformaciones, problemas de contacto, etc.), el dimensionamiento de estos elementos y el cálculo de su rigidez se basa actualmente en la utilización del método de los elementos finitos.

e) Resortes neumáticos

Los resortes neumáticos se están imponiendo como suspensión de vehículos de carretera pesados (camiones, autobuses) y, en gran parte de las aplicaciones, como suspensión secundaria de vehículos ferroviarios.

Presentan las siguientes ventajas:

- La curva fuerza-deformación es progresiva, lo que proporciona una frecuencia natural, casi independiente de la carga soportada.
- Al contrario de los resortes, poseen una gran capacidad de filtrado de las frecuencias elevadas.
- Permiten mantener altura de suspensión constante, mediante la inyección y extracción de aire de los resortes neumáticos.
- Existe la posibilidad de añadir amortiguamiento neumático, evitando la necesidad de incorporar amortiguadores adicionales.
- Hacen trabajar a los amortiguadores alrededor de una posición determinada.
- Reducen la amplitud de cabeceo y balanceo, al aceptar una ligera corrección dinámica.
- Atenúan los ruidos de las ruedas y los frenos, al no existir ninguna unión mecánica directa entre las ruedas y la parte suspendida.

En la figura 2.28 se muestra el esquema de un bogie, diferenciando las diferentes suspensiones, primaria y secundaria.

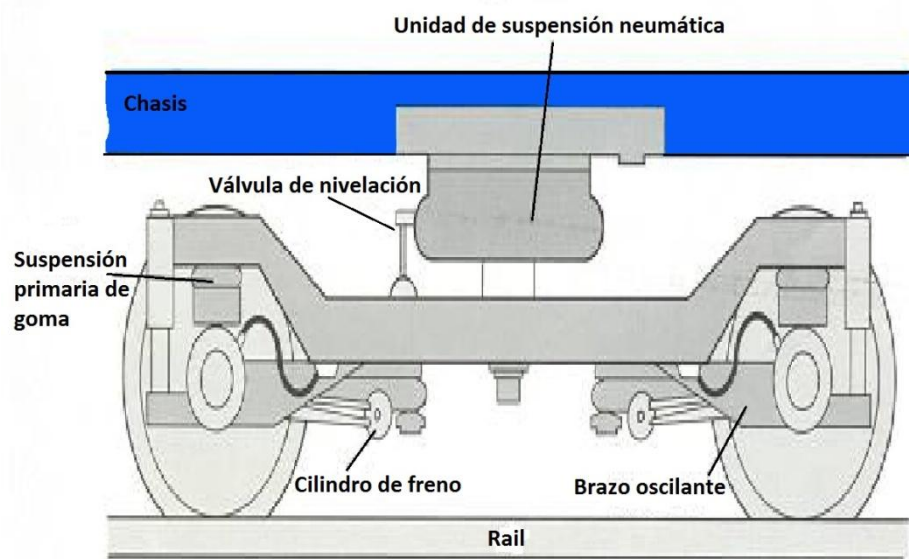


Figura 2.28. Esquema bogie

Por otra parte, el mantenimiento de la suspensión neumática es poco costoso y esta suspensión es menos pesada que una suspensión metálica, especialmente cuando el vehículo está ya provisto de un suministro de aire comprimido o aceite a presión utilizado para otros fines.

Por el contrario, presentan los inconvenientes siguientes:

- Un deterioro de los resortes o una deficiencia de la fuente de energía deja sin efecto la suspensión, siendo esta la razón de que ciertos constructores combinen la suspensión neumática con una suspensión metálica.
- La suspensión neumática, al carecer de estabilidad longitudinal y transversal obliga a la utilización de órganos de empuje y de reacción, lo cual aumenta el peso del conjunto.

f) Amortiguadores

La suspensión de un vehículo ferroviario está compuesta por múltiples componentes, entre los que se han señalado anteriormente como ballestas, que proporcionan simultáneamente rigidez y amortiguamiento, sin embargo; esto no es siempre así y la mayor parte de los sistemas de suspensión requieren la utilización de elementos amortiguadores.

El amortiguador tiene como misión devolver en el mínimo de tiempo el resorte a su posición de equilibrio, absorbiendo, desde el punto de vista del confort, la energía cinética transmitida a la masa suspendida y reduciendo, desde el punto de vista de la estabilidad en ruta, el tiempo durante el cual varía la adherencia de las ruedas. En la figura 2.29 se muestra un esquema del amortiguador de un bogie.

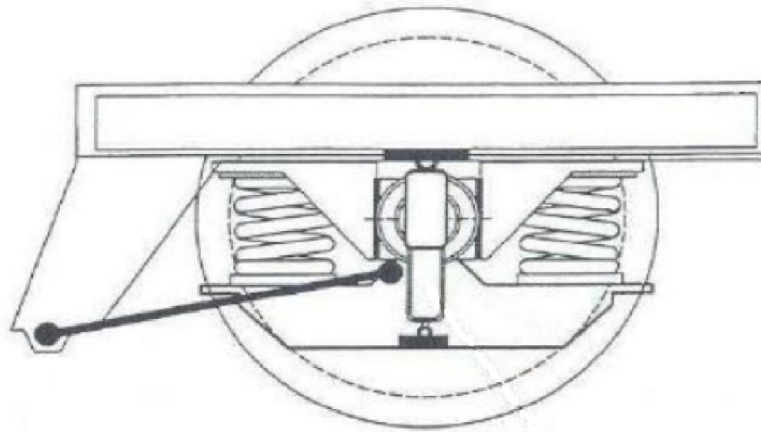


Figura 2.29. Amortiguador en bogie

El amortiguamiento está solicitado por dos movimientos oscilatorios diferentes. Es necesario frenar simultáneamente las oscilaciones de la masa suspendida y las de la masa no suspendida a fin de evitar el rebote de las ruedas sin endurecer demasiado la suspensión, ya que las frecuencias de oscilación de estas masas son muy diferentes entre sí.

Toda acción del amortiguador sobre la rueda encuentra normalmente su reacción sobre la parte suspendida, a menos de amortiguar separadamente las oscilaciones de la parte suspendida y de la parte no suspendida, o cuando menos, reducir estas últimas mediante un dispositivo especial.

Es conveniente que el amortiguador no intervenga, en las oscilaciones de poca amplitud y de alta frecuencia, pues de lo contrario la masa suspendida estaría sometida a trepidaciones sin obtenerse una mejora sensible de la estabilidad en ruta.

La velocidad y la aceleración de las oscilaciones son función no solo de la amplitud sino también de la frecuencia, y esta última varía, para una rigidez determinada, de acuerdo con el estado de carga, a menos que la rigidez no varíe en función de la carga de manera apropiada, para obtener una frecuencia constante.

Existen clases distintas de amortiguadores utilizados en los sistemas de suspensión. Los más usados pueden clasificarse en dos grupos: amortiguadores de fricción y amortiguadores hidráulicos.

Los amortiguadores de fricción se utilizan en suspensiones de vagones de mercancías de vehículos ferroviarios. Constan de elementos de fricción a los cuales se deriva o se hace pasar parte de la carga vertical que los precomprimen. Otras veces, la precompresión se obtiene mediante resortes específicos. La fricción generada de estos elementos por el movimiento de la suspensión proporciona una fuerza amortiguadora. En la figura 2.30 se muestra un ejemplo de bogie en el cual se emplea este tipo de amortiguación.



Figura 2.30. Bogie con amortiguadores de fricción

Los amortiguadores de fricción presentan varias desventajas entre las que cabe citar:

- En tanto no se supera la fuerza de fricción la suspensión permanece bloqueada, y el vehículo queda sin suspensión.
- Una vez superada la fuerza de fricción, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad como sería deseable.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario reponer las piezas desgastadas periódicamente.

Como consecuencia de estas limitaciones, tanto en vehículos de carretera, como en los ferroviarios destinados a servicios de pasajeros, se han impuesto

los amortiguadores hidráulicos. En estos la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad.

Básicamente, los amortiguadores hidráulicos constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que existe aceite a ambos lados del pistón (debido a que los obstáculos están repartidos al azar y que la probabilidad de encontrar un obstáculo en relieve es la misma que la de encontrar una depresión, es conveniente que el amortiguador sea de doble efecto). Sobre este, existen una serie de orificios y una válvula adicional precomprimida que permite el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado.

Existen varios tipos de amortiguadores en el mercado. Los más comunes en ferrocarriles son los de doble tubo presurizados, cuyo fluido de trabajo es aceite y no presurizados, que utilizan aceite y gas; y los amortiguadores monotubo presurizados. La solución de amortiguamiento más económica es la de doble tubo no presurizado. En la figura 2.31 se muestran los cilindros monotubo y bitubo.

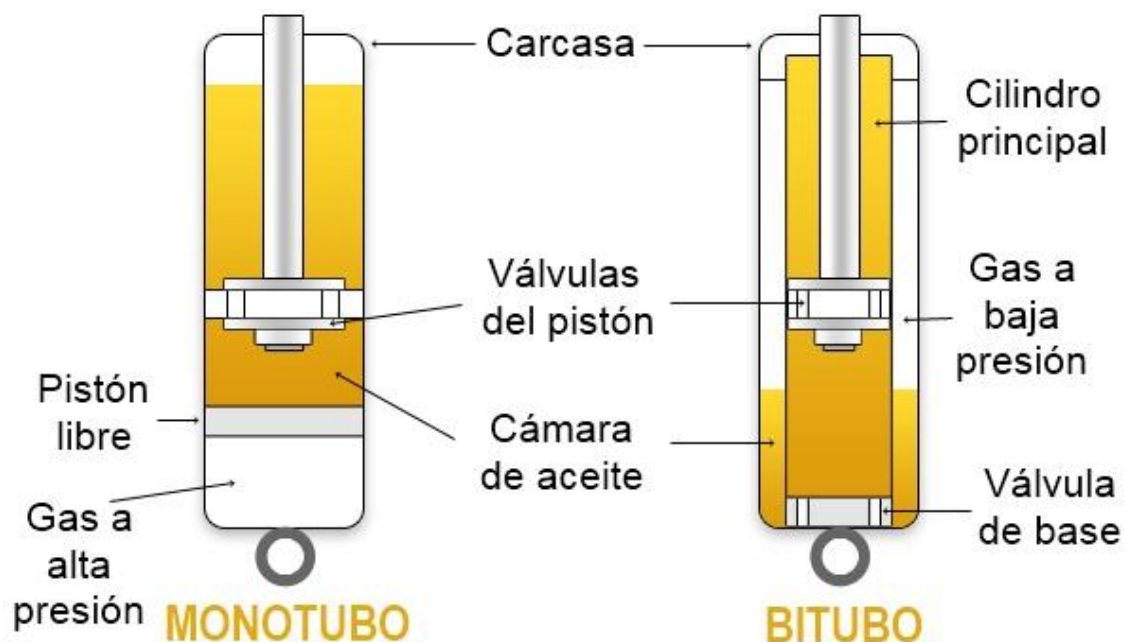


Figura 2.31. Cilindro monotubo (derecha), cilindro bitubo (izquierda)

2.3 Suspensiones en vehículos ferroviarios: bogie

El bogie es la estructura rodante sobre la que descansan los vagones de ferrocarril y las locomotoras actuales que no utilizan ejes simples. Las funciones principales del bogie son:

- Soportar la carrocería del vehículo ferroviario
- Proporcionar estabilidad en tramos de vías rectas y en curvas.
- Garantizar el confort de marcha mediante la absorción de las vibraciones y minimizar las fuerzas centrífugas cuando el tren circula por curvas a alta velocidad.
- Minimizar la generación de irregularidades en la vía ferroviaria y la abrasión de la misma.

Se distinguen diferentes tipos de bogies en función de su número de ejes, diseño y estructura de la suspensión. A continuación se exponen las distintas clasificaciones.

2.3.1 Clasificación de los bogies de acuerdo al número de ejes

La estructura mínima requerida para la construcción de un bogie es un eje y dos llantas, las cuales son usualmente ensambladas al eje.

El bogie de dos ejes es el más común. Además de su estructura relativamente simple, tiene la ventaja de disminuir el impacto de las irregularidades de la vía sobre el vagón en el punto de suspensión del carro, en comparación con el bogie de un solo eje, el cual transmite el impacto al carro directamente. El bogie de tres ejes tiene una estructura más compleja, lo cual tiende a afectar desfavorablemente al diseño del chasis del bogie, por lo que no son usados para vagones de pasajeros. [8]

En la figura 2.32 se muestra una comparación de los bogies de uno y dos ejes frente a las irregularidades de la vía.

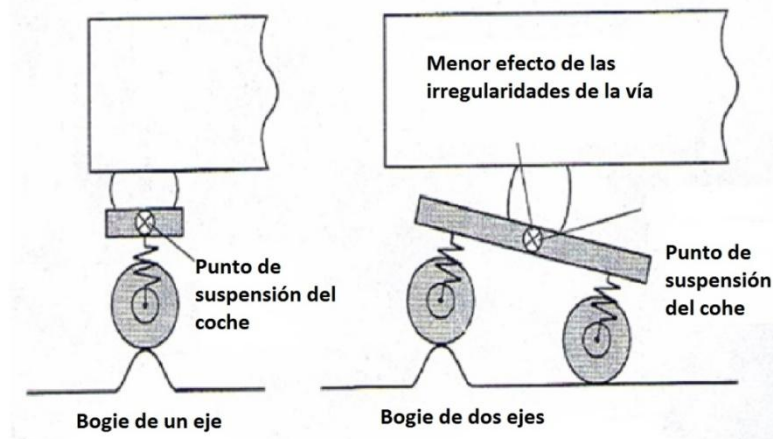


Figura 2.32. Comparación del efecto de las irregularidades de la vía entre el bogie de un eje y el de dos ejes

2.3.2 Bogie articulado y no articulado

Los bogies pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de suspensión en articulados y no articulados. Normalmente, un vagón es soportado por dos bogies no articulados. Los bogies articulados, se colocan dos por vagón, uno en cada extremo, de manera que también trabaja con el vagón contiguo. La figura 2.33 muestra una comparación entre coche con bogies articulados y no articulados.

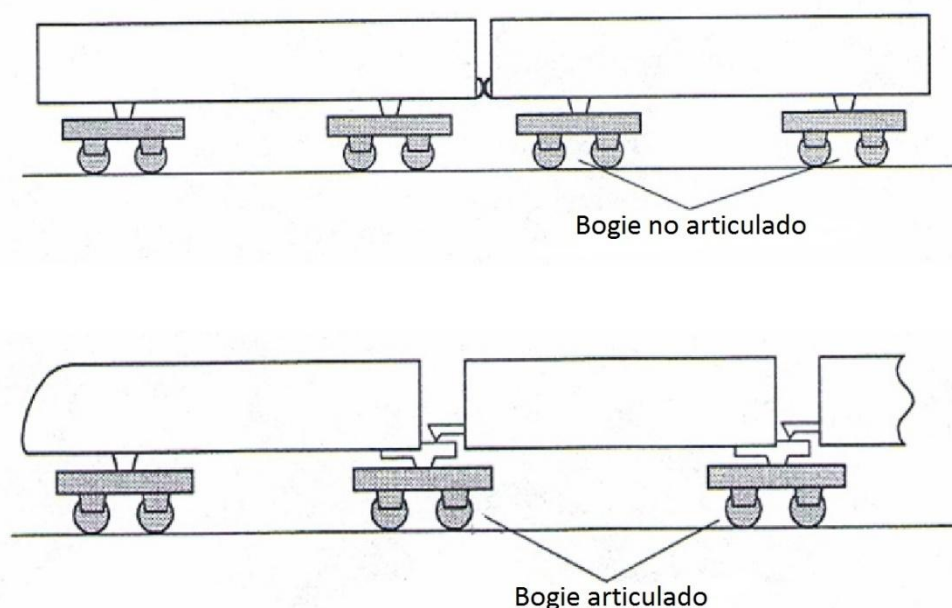


Figura 2.33. Comparación entre coche con bogies articulados y no articulados

El bogie articulado tiene algunas desventajas, tales como una estructura compleja y un aumento de la carga sobre el eje , debido al soporte de dos cuerpos por cada bogie. Sin embargo, también presenta varias ventajas, como un centro de gravedad más bajo, mejor confort en el viaje y además, los pasajeros perciben menor ruido durante el funcionamiento porque los asientos no están sobre el bogie.

2.3.3 Clasificación de los bogies según la estructura de la suspensión

Basados en la estructura del engranaje de la suspensión, los bogies pueden ser clasificados en dos tipos:

- Bogies de barra de suspensión oscilante
- Bogies de resorte soportado por pequeña rigidez lateral

Para garantizar el confort de los pasajeros, el bogie debe absorber los movimientos debidos al rozamiento. En el diseño convencional de los bogies de barras de suspensión oscilante, soportan el cuerpo del vagón utilizando vigas de soporte de balance bajo, las cuales se encuentran suspendidas del chasis por medio de eslabones, consistentes en dos miembros verticales que se ensanchan hacia abajo , junto con resortes soporte y vigas de soporte de balance superior para soportar el movimiento vertical.

Aunque el tipo de barra oscilante logra un gran confort al minimizar la rigidez horizontal del sistema, éste presenta dificultades debido a la compleja estructura y el gran número de partes de desgaste.

En la figura 2.34 se muestra un bogie de barra de suspensión oscilante.

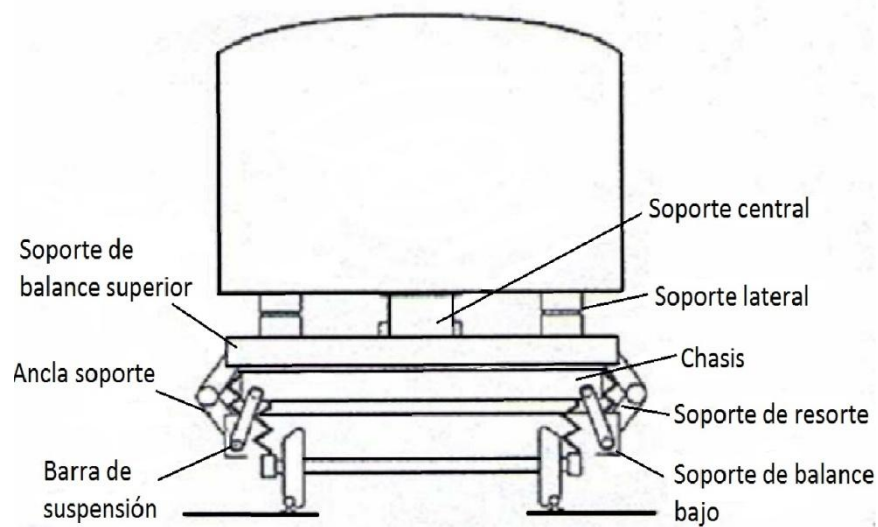


Figura 2.34. Bogie de barra de suspensión oscilante

En 1960, fue desarrollado el bogie de resorte soportado con suspensión de aire para absorber vibraciones causadas por la pequeña rigidez lateral. Sustituyó al tipo de barra oscilante debido a su gran contribución en la disminución de tamaño y peso. Los bogies más recientes son de este tipo. La figura 2.35 muestra el esquema de un bogie de resorte soportado con pequeña rigidez lateral.

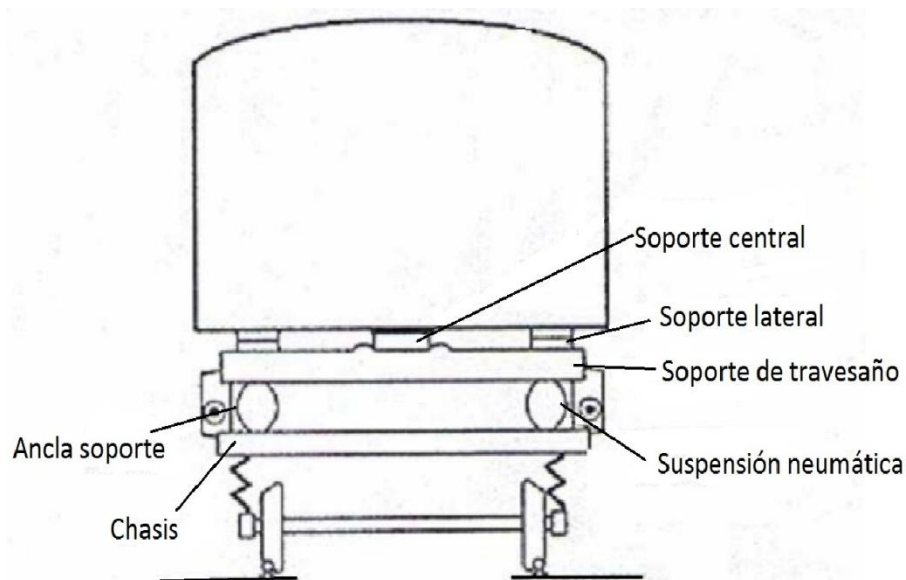


Figura 2.35.

Figura 2.35. Bogie de resorte soportado con pequeña rigidez lateral

2.3.4 Bogies soportados y semisoportados

Los bogies soportados y semisoportados se diferencian por el engranaje en el sistema de suspensión. Los bogies soportados fueron los primeros que se desarrollaron. Su característica fundamental es que deben rotar relativos al cuerpo del vagón en las curvas, mientras mantienen una alta resistencia a la rotación durante la circulación del vehículo en una sección recta, con la finalidad de prevenir la oscilación de los ejes que puede afectar al confort de los pasajeros. Para lograr esto, este tipo de bogie posee un pivote central que sirve como centro de rotación, y soportes laterales que resisten la rotación. La figura 2.36 muestra el esquema de un bogie soportado

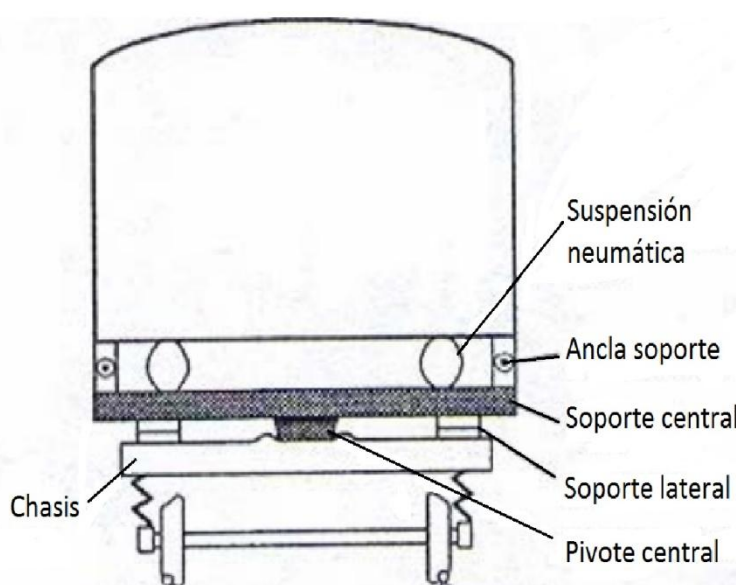


Figura 2.36. Bogie soportado

En 1980 se comenzaron a comercializar los bogies semi-soportados, este tipo de diseño mejoraba al anterior al reducir el número de partes y el peso del bogie. Los bogies semisoportados permiten el desplazamientos rotacionales en curvas, a través de la deformación horizontal de la suspensión secundaria, en ambos lados del bogie. La rotación se resiste por amortiguadores longitudinales antivuelco (en ambos lados del bogie) lo cual conlleva a una mejor resistencia rotacional que los soportes laterales.

La figura 2.37 muestra un esquema de un bogie semi-soportado.

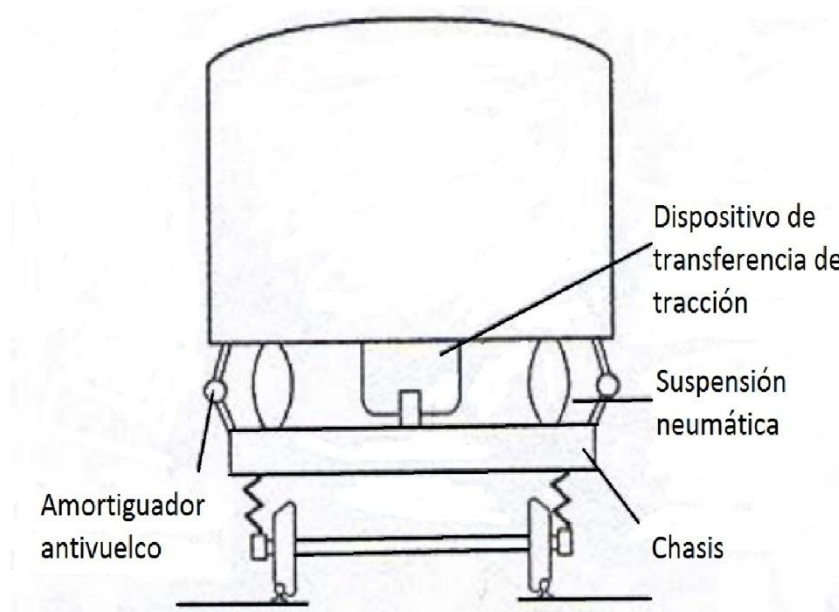


Figura 2.37. Bogie semi-soportado

A continuación se expone los elementos que componen un bogie convencional y sus características más relevantes.

Los componentes clave de un bogie incluyen:

- El bastidor del bogie en sí.
- La suspensión para absorber los choques entre el bastidor del bogie y la carrocería de los vehículos ferroviarios. Los tipos más comunes son los resortes en espiral o los balones de aire.
- Juego de ruedas, compuesto por un eje con rodamientos y ruedas en cada extremo.
- Equipamiento de frenado. Los dos equipamientos más conocidos son mediante zapatas de freno, que se presionan contra la banda de rodadura de la rueda, y mediante frenos de disco y pastillas. Además, existe otro sistema basado en corrientes de Foucault, que provoca una fuerte deceleración y cuyo uso está por tanto restringido a frenados de emergencia.
- En los bogies motores, los mecanismos que provocan el movimiento, es decir, los motores y mecanismos de tracción.

- Elementos auxiliares como pueden ser antenas, sistemas de limpieza, balizas para diferentes usos, valvulería neumática, sistemas de medición de velocidad y cajas de grasa, que son los elementos de unión entre los ejes y el bastidor del bogie.

Como se ha indicado anteriormente, en el bogie va instalado el sistema de suspensión de un tren. Se puede diferenciar la suspensión primaria y secundaria, cuya función y funcionamiento se explica a continuación.

2.3.4.1 Suspensión primaria

Entre el conjunto de ejes y ruedas y el bastidor del bogie, siempre se intercala un sistema de suspensión que, como primer órgano flexible entre dicho conjunto y el tren, se denomina suspensión primaria .[7]

La suspensión primaria cumple dos funciones. Por una parte reduce el nivel de vibraciones que soporta el bastidor del bogie y los elementos montados sobre él. Por otra parte asegura un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas, lo cual es fundamental de cara a las prestaciones de freno y tracción y para evitar el riesgo de descarrilamiento.

Los elementos de la suspensión primaria, además de asegurar la suspensión vertical, están relacionados con el guiado de los ejes en direcciones longitudinales y laterales. Las rigideces de guiado resultan determinantes para definir la estabilidad dinámica del vehículo y los esfuerzos rueda-carril que se producen al paso por la curva.

En la figura 2.38 se muestra el efecto de la suspensión primaria en el guiado de la rueda.

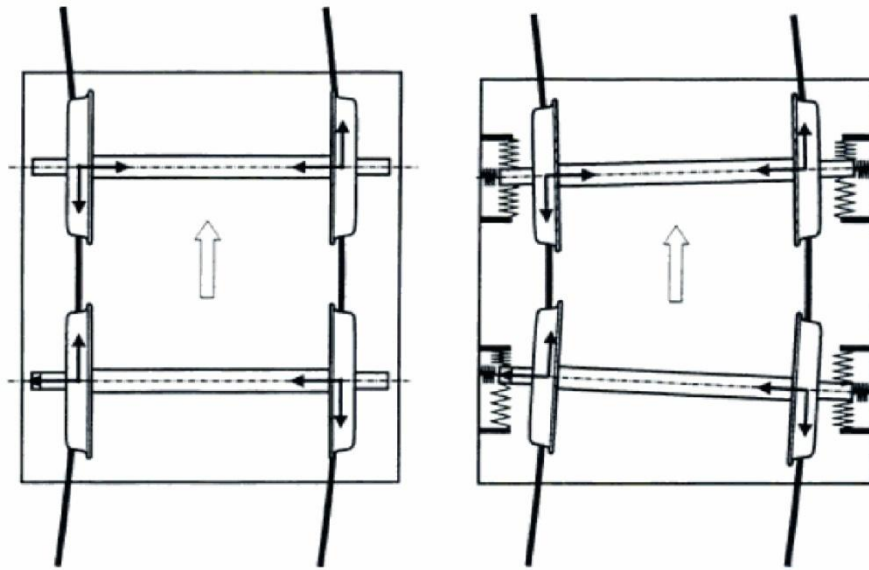


Figura 2.38. Efecto de la suspensión primaria e el guiado de la rueda [12]

A medida que aumentan las sollicitaciones dinámicas y velocidades, estas suspensiones primarias se complican, pasando del simple montaje de resorte y amortiguador, o de campanas de goma o caucho, a montajes muy complejos. En la figura 2.39 se muestra el montaje de la suspensión primaria en un bogie.

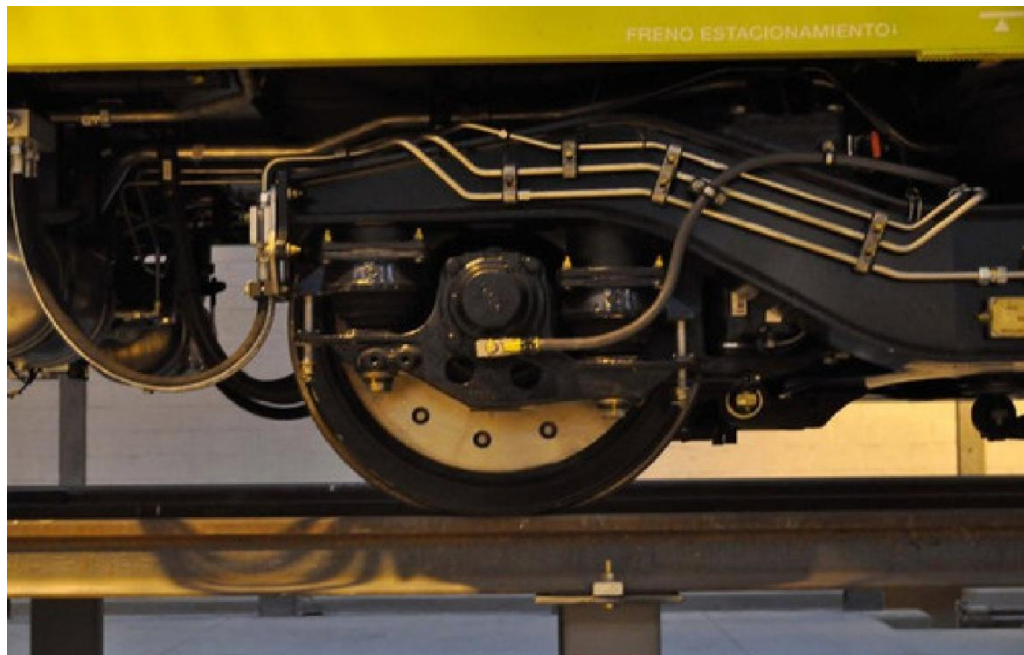


Figura 2.39. Suspensión primaria en bogie

2.3.4.2. Suspensión Secundaria

A su vez, entre la propia caja del coche ferroviario y el bogie, hay una segunda suspensión que, como tal, se denomina suspensión secundaria.

La suspensión de los vehículos ferroviarios debe asegurar el filtrado de las vibraciones, no sólo en dirección vertical, sino también en dirección lateral. Este filtrado, en los vehículos guiados, es responsabilidad de la suspensión secundaria. Por este motivo, las suspensiones secundarias presentan una alta flexibilidad en ambas direcciones, vertical y lateral [7].

En dirección vertical es habitual la utilización de suspensiones con frecuencia natural próxima a 1 Hz. Esta elección se debe a que es a esta frecuencia a la que el ser humano mejor soporta los movimientos verticales, debido a que el centro de gravedad de nuestro cuerpo oscila con esta frecuencia al caminar, ya que nuestros órganos internos se mueven durante la marcha oscilando verticalmente aproximadamente con esta frecuencia.

La suspensión secundaria puede ser también de muelles, o mediante gomas o balones llenos de aire comprimido; sistema muy utilizado por la comodidad que supone para el viajero, en redes a velocidades moderadas. La figura 2.40 muestra la suspensión secundaria mediante balones de aire comprimido de un bogie.

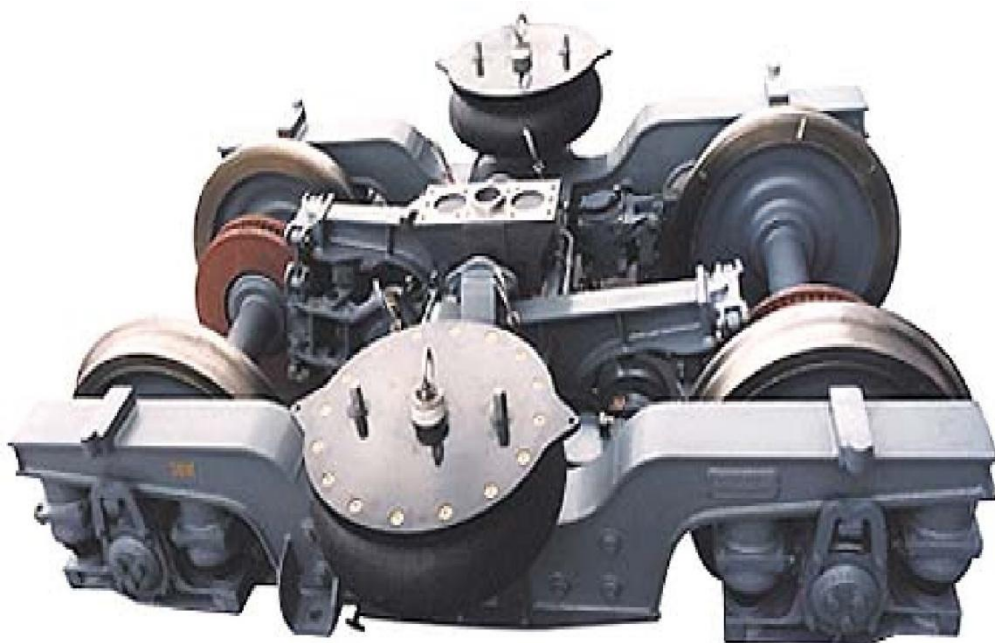


Figura 2.40. Suspensión secundaria en bogie

Este diseño ofrece numerosas ventajas. Una de ellas es que el mantenimiento es nulo o mínimo. Por otro lado, es posible una facilidad de regulación mediante la incorporación de mayor o menor presión en los balones de aire según la carga de viajeros o situación del tren en curva o recta y mantiene constante el nivel de la altura de piso respecto a la altura de carriles.

Adicionalmente, de la presión incorporada se obtiene la información de carga de viajeros, necesaria para la regulación eléctrica de motores, a fin de conseguir procesos de arranque y freno a aceleración constante e independiente de dicha carga de viajeros.

El montaje real de estas suspensiones neumáticas consiste en disponer un balón de aire por cada lado del costado del bogie, sobre los cuales descansa la caja a través de una viga (comúnmente denominada “bailadora” por su giro sobre el rodamiento de bolas o rodillo superior).

Capítulo 3. Modelado en Elementos Finitos

Los sistemas de ingeniería asistida por ordenador utilizan la técnica de modelado y análisis por el Método de Elementos Finitos, el cual permite obtener una solución aproximada del comportamiento de una pieza o de un mecanismo frente a una sollicitación externa.

3.1 Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos finitos se ha convertido en la solución más efectiva para predecir posibles fallos debidos a tensiones desconocidas en prototipos, mostrando los problemas de la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las tensiones involucradas. Este método de diseño y prueba virtual del producto es una gran ventaja en la etapa de desarrollo de un nuevo modelo, frente al elevado costo de manufactura asociado a la construcción de cada ejemplar para las pruebas del método de ensayo y error.

Entre los campos de aplicación del Método de Elementos Finitos se pueden destacar los siguientes:

- Cálculo y análisis estructural lineal y no lineal, estático y dinámico.
- Análisis de vibraciones.
- Impactos mecánicos.
- Transferencia de calor en regímenes estacionario y transitorio.
- Cinemática y dinámica de mecanismos.
- Electromagnetismo.
- Mecánica de fluidos y análisis reológicos.
- Acústica.

Los programas informáticos que emplean el Método de Elementos Finitos, integran la mayoría de los ámbitos, de tal manera que se puede estudiar un elemento sometido a múltiples sollicitaciones simultáneas de distinta naturaleza, lo cual hace que los resultados obtenidos sean más aproximados a los de un ensayo real [9].

El método se basa en la discretización de la geometría continua del objeto de estudio, convirtiéndola en una geometría más simple. A ésta operación se la denomina mallado. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de mallado en un sólido.

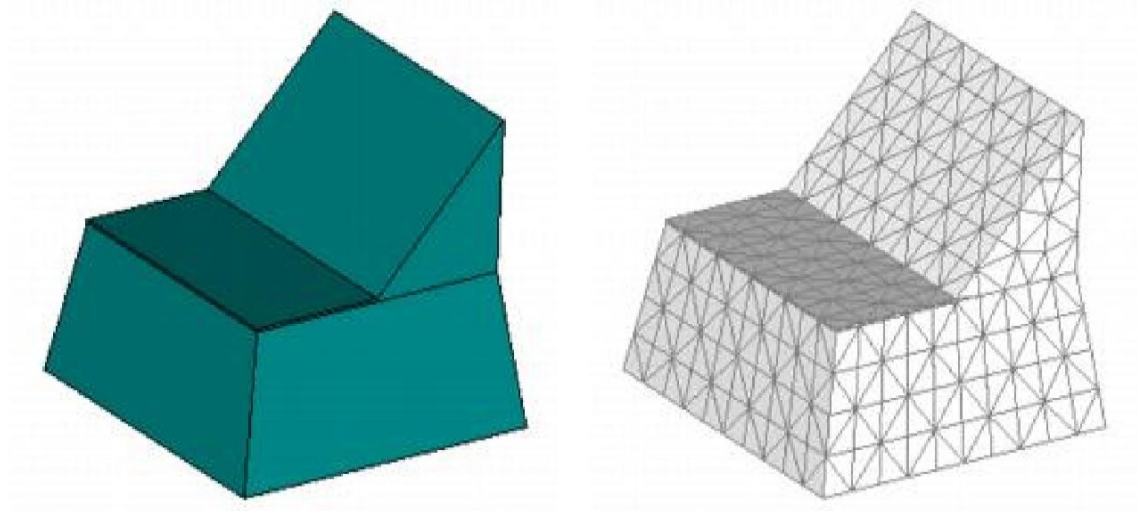


Figura 3.1. Discretización en geometría

La solución obtenida por el Método de Elementos Finitos es aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos. La figura 3.2 muestra la discretización realizada en una curva mediante el método de elementos finitos.

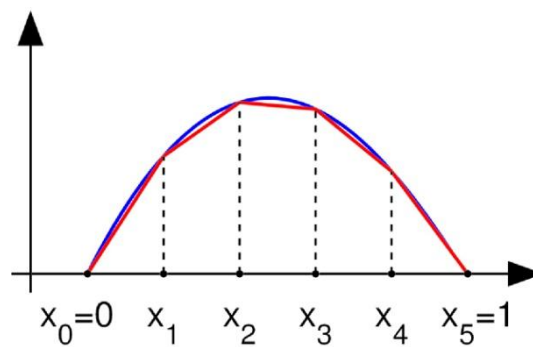


Figura 3.2. Método de Elementos Finitos

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular, las tareas necesarias a seguir para llevar a cabo un análisis por el Método de Elementos Finitos se dividen en:

- Preproceso

El cual consiste en la definición de la geometría y su discretización mediante el mallado, establecer las condiciones de contorno y asignar propiedades a los materiales. Es importante la elaboración del mallado correctamente de manera que garantice una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

- Cálculo

Como resultado del preproceso, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo si se trata de un problema lineal, o bien cuando se trata de un problema dependiente del tiempo o no lineal, el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones con N incógnitas que debe resolver uno a continuación del otro y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

- Postproceso

En éste módulo se calculan las magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

3.2 Descripción del programa solidEdge

Solid Edge es un programa de diseño asistido por ordenador, especialmente ideado para realizar modelado virtual de piezas tridimensionales y conjuntos.[9]

La creación de piezas, planos, chapas o conjuntos en Solid Edge se realiza mediante diferentes entornos, generándose archivos con extensiones propias a cada entorno. De éste modo, se emplea el más adecuado a las necesidades del diseño.

Las principales posibilidades de Solid Edge se resumen en:

- Creación y edición de piezas en 3D.
- Ensamblaje de conjuntos.
- Simulación de movimiento.
- Creación y edición de planos en 2D.
- Diseños específicos como piezas de chapa o soldadura tridimensional.

3.3. Modelado de un bogie en Solid Edge

Para construir el bastidor de nuestro bogie, se lleva a cabo el modelado en el programa SolidEdge de un total de 17 piezas.

3.2.1 Entorno pieza

En esta sección se muestran cada una de las piezas modeladas en Solid Edge para A construir el conjunto total del bastidor del bogie.

En la Figura 3.3 se muestra la riostra, con referencia 00.457.04.047.

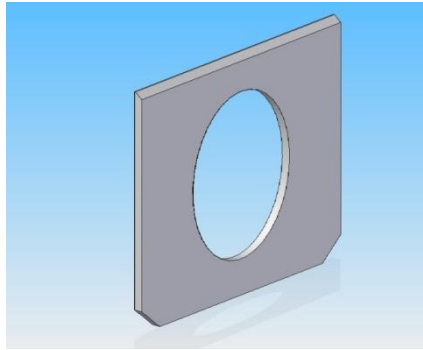


Figura 3.3. Riostra

En la Figura 3.4 se muestra el refuerzo de traviesa, con referencia 00.457.04.046.

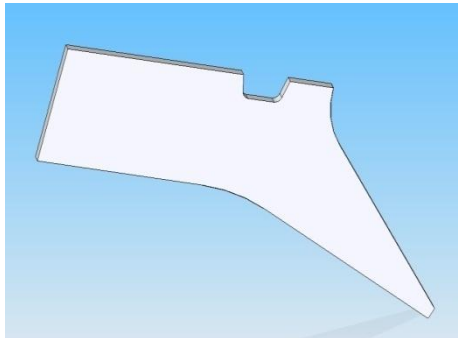


Figura 3.4. Refuerzo Traviesa

En la Figura 3.5 se muestra el nervio, con referencia 00.457.04.045.

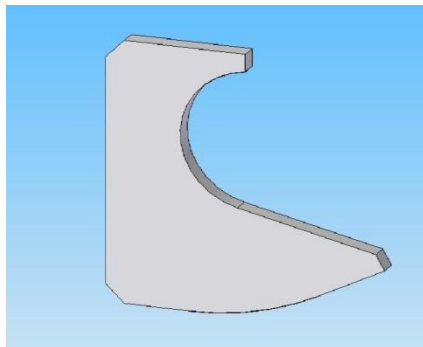


Figura 3.5. Nervio

En la Figura 3.6 se muestra el refuerzo extremo, con referencia 00.457.04.044.

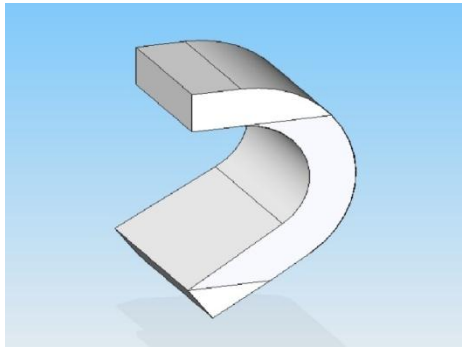


Figura 3.6. Refuerzo extremo

En la Figura 3.7 se muestra el alma, con referencia 00.457.04.043.

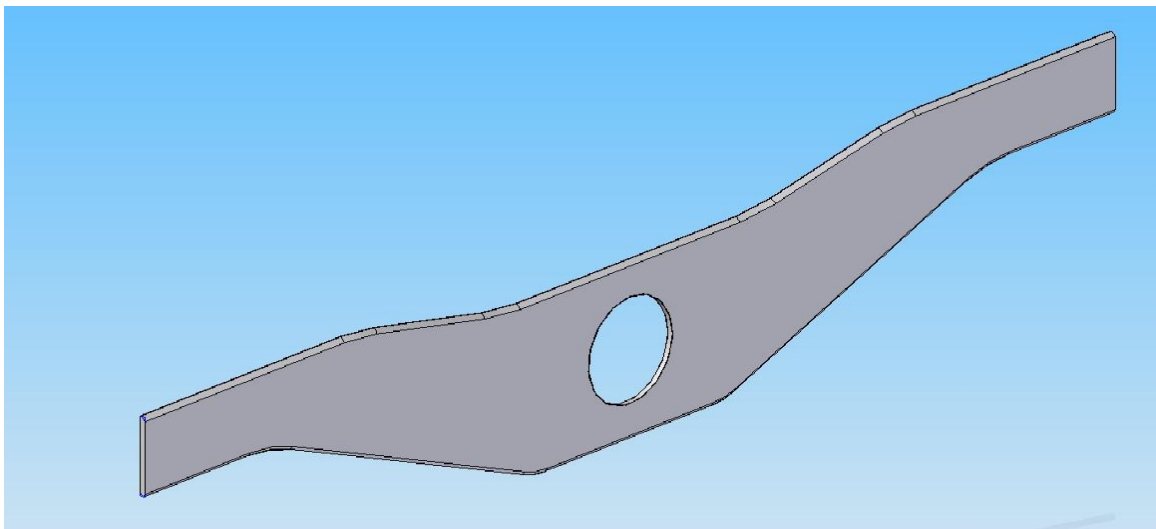


Figura 3.7. Alma

En la Figura 3.8 se muestra la plataforma inferior, con referencia 00.457.04.042.

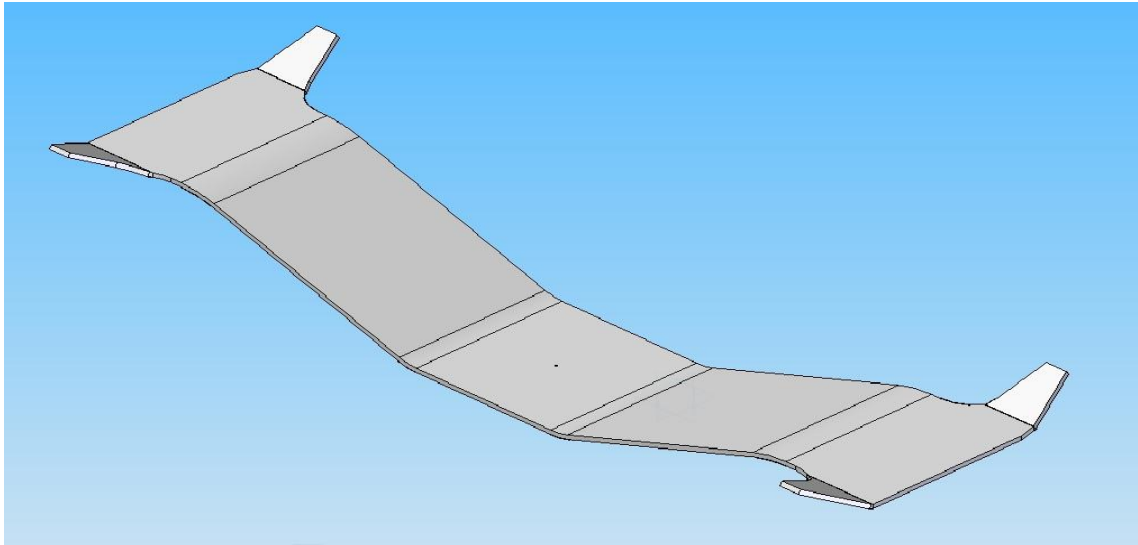


Figura 3.1. Plataforma inferior

En la Figura 3.9 se muestra la plataforma superior, con referencia 00.457.04.041.

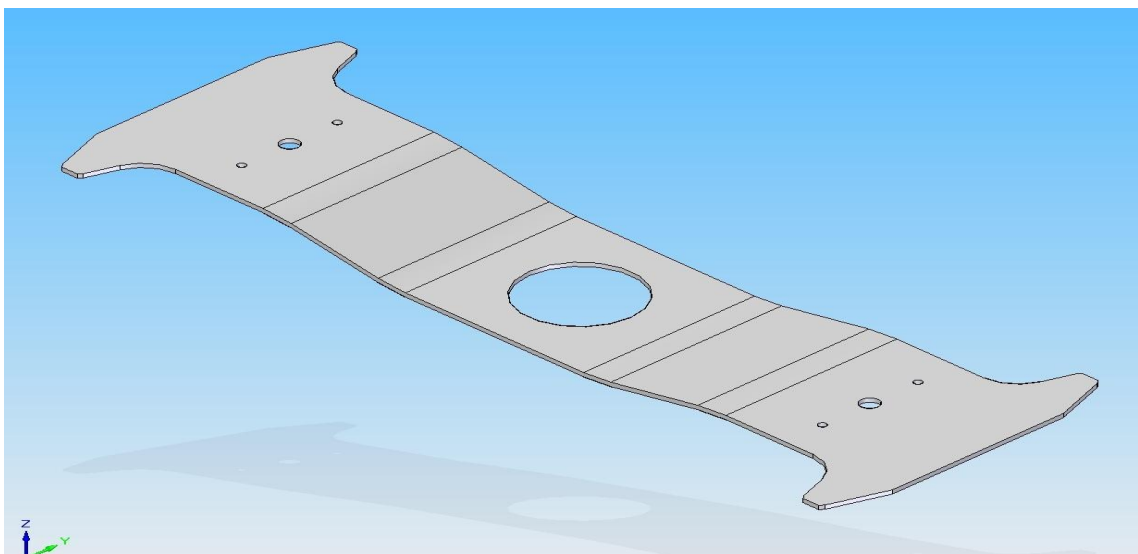


Figura 3.9. Plataforma superior

En la Figura 3.10 se muestra el alma, con referencia 00.457.04.033.

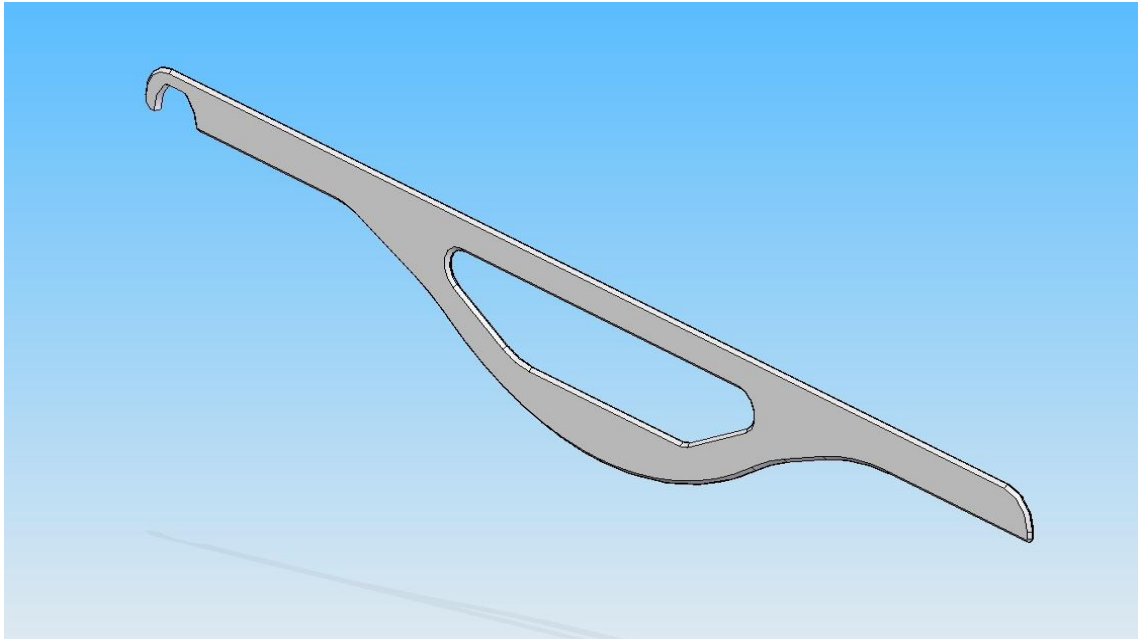


Figura 3.10. Alma

En la Figura 3.11 se muestra el ala inferior, con referencia 00.457.04.032.

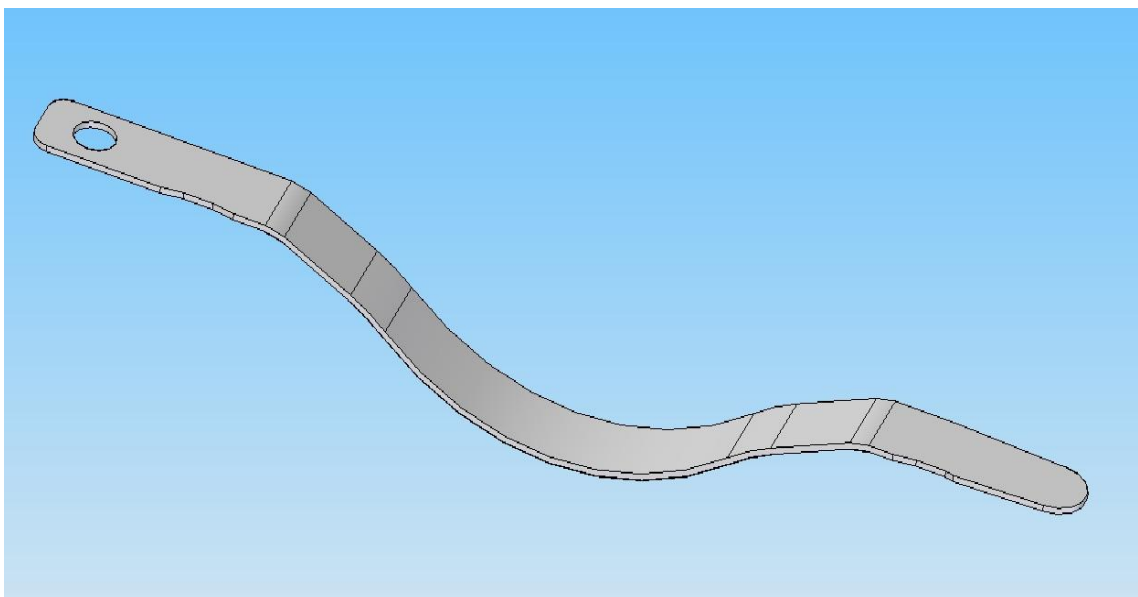


Figura 3.11. Ala inferior

En la Figura 3.12 se muestra el ala superior, con referencia 00.457.04.031.

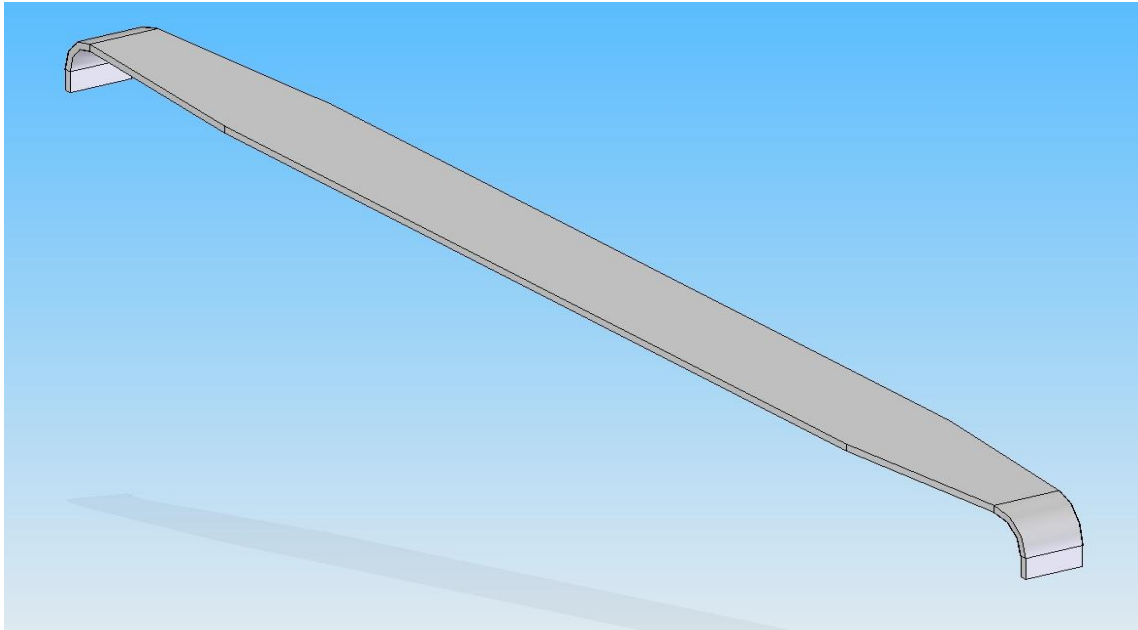


Figura 0.2. Ala superior

En la Figura 3.13 se muestra el refuerzo extremo, con referencia 00.457.04.034.

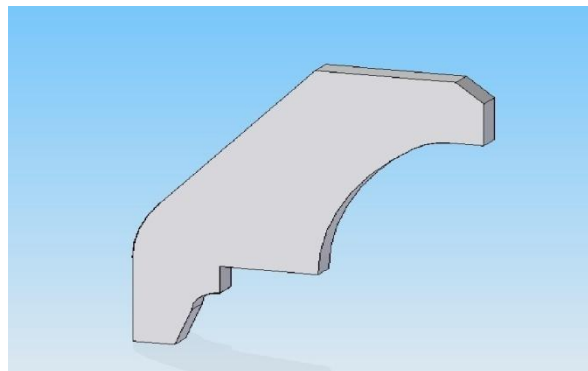


Figura 3.13. Refuerzo extremo

En la Figura 3.14 se muestra el conjunto limitador, con referencia 00.457.04.020.

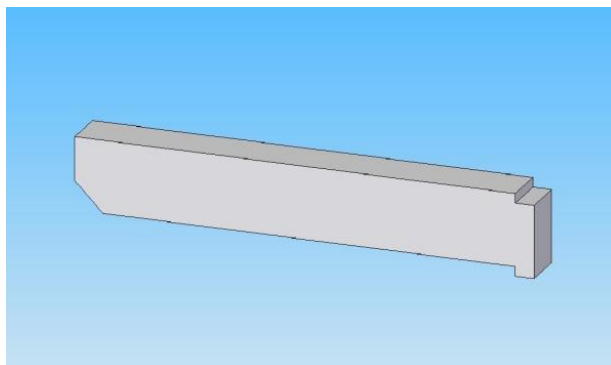


Figura 3.14. Conjunto limitador

En la Figura 3.15 se muestra el refuerzo limitador, con referencia 00.457.04.015.

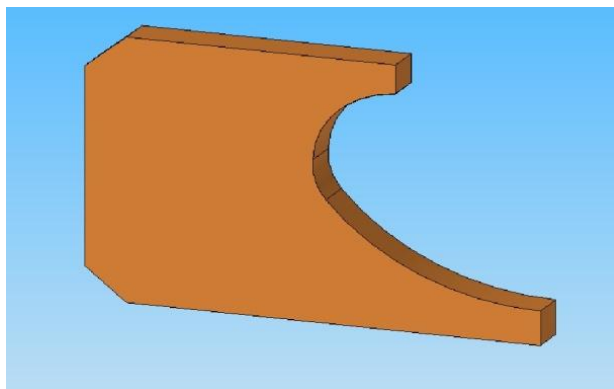


Figura 3.15. Refuerzo limitador

En la Figura 3.16 se muestra el refuerzo del alma, con referencia 00.457.04.014.

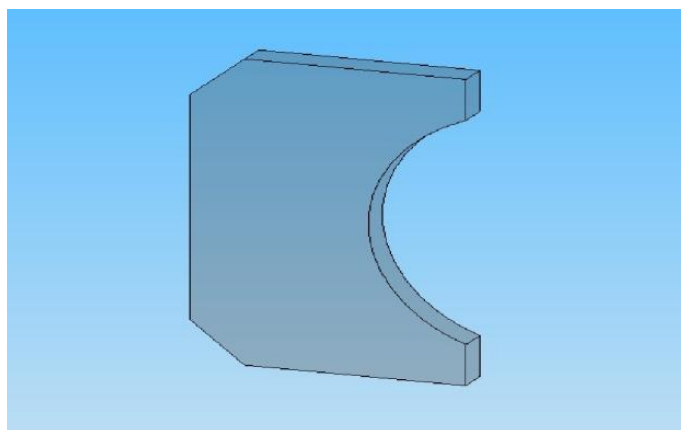


Figura 3.16. Refuerzo alma

En la Figura 3.17 se muestra el alma, con referencia 00.457.04.013.

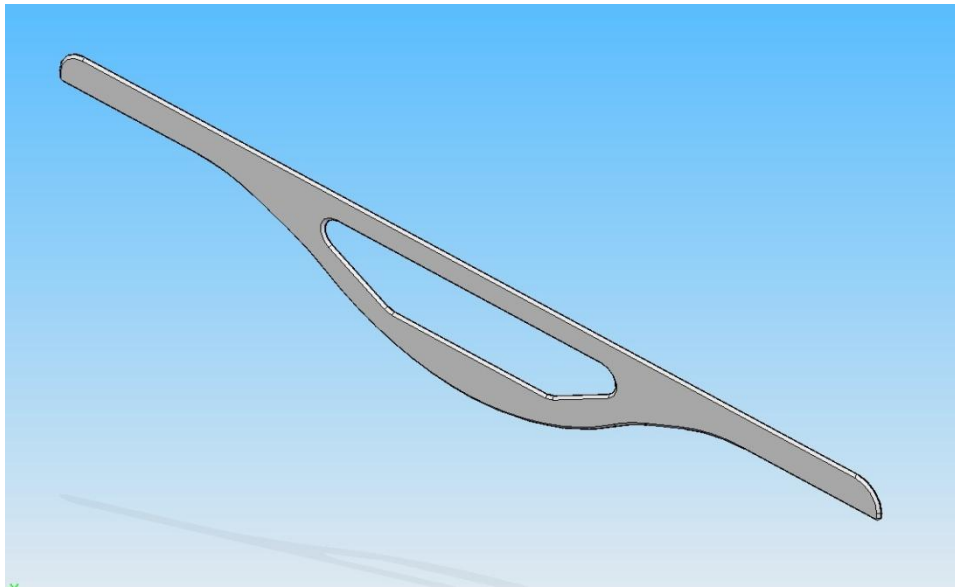


Figura 3.17. Alma

En la Figura 3.18 se muestra el ala inferior, con referencia 00.457.04.012.

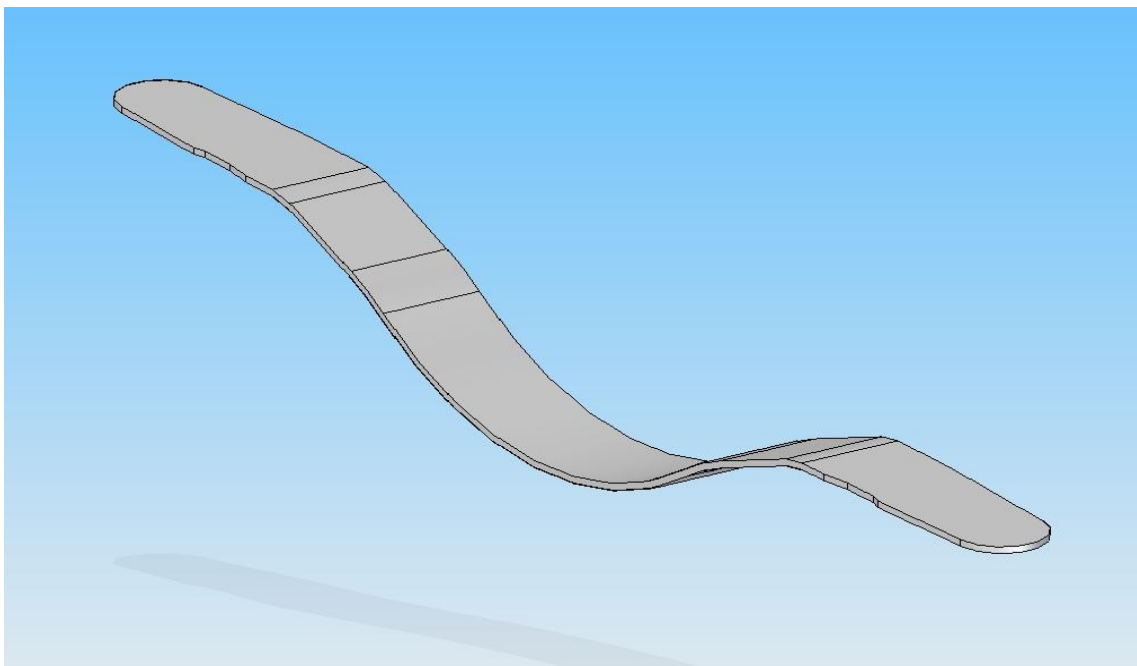


Figura 3.18. Ala inferior

En la figura 3.19 se muestra el ala superior, con referencia 00.457.04.011.

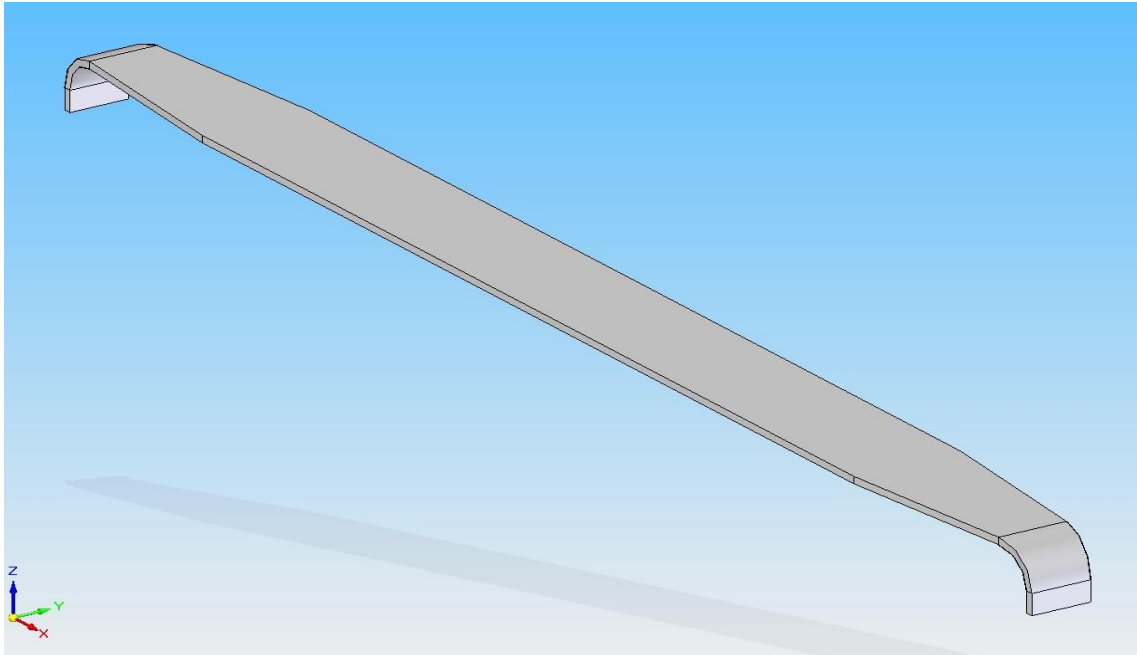


Figura 3.19. Ala superior

3.2.2. Entorno conjunto

El entorno conjunto en Solid Edge permite hacer ensamblados de las piezas anteriormente modeladas en entorno pieza.

El conjunto total es el resultado del ensamblado de tres subconjuntos: Subconjunto traviesa – pivote y dos subconjuntos del larguero, los cuales se muestran a continuación.

3.2.2.1. Subconjunto traviesa-pivote

Éste subconjunto está compuesto por un total de 16 piezas, se trata de la parte central del bastidor, la cual une los dos largueros laterales. Sobre la parte superior de este conjunto estará colocada la suspensión secundaria, la cual amortigua las oscilaciones debidas al peso propio del coche.

En la figura 3.20 se muestra una imagen del subconjunto traviesa-pivote.

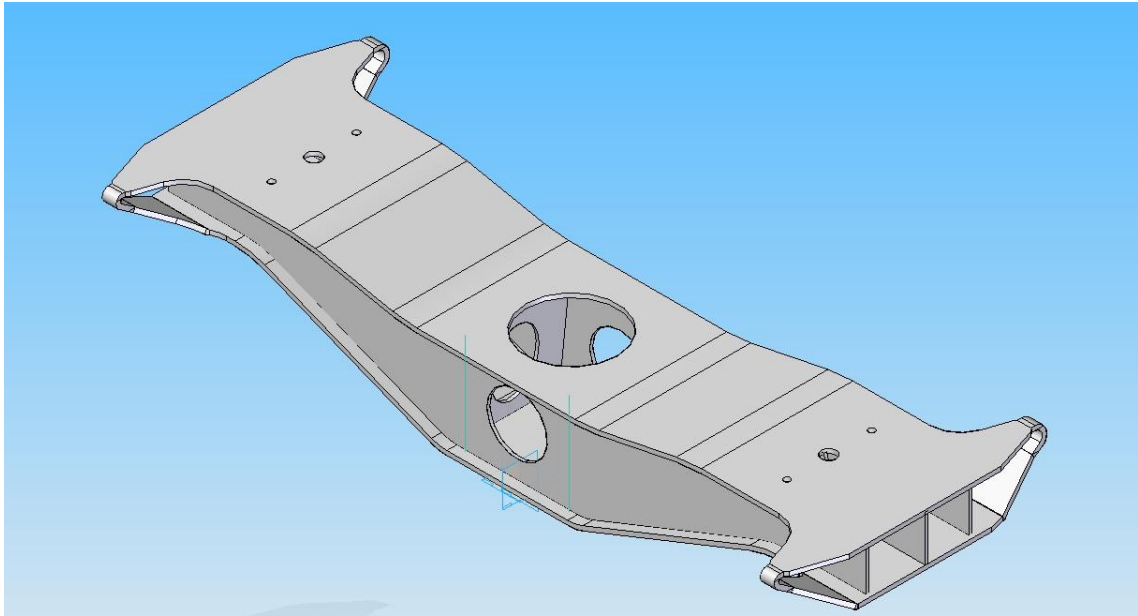


Figura 3.20. Subconjunto traviesa-pivote.

El subconjunto traviesa-pivote está compuesto por un total de 16 piezas. En la tabla 3.1 se incluye un listado con las distintas piezas que forman el subconjunto.

Tabla 3.1. Elementos del subconjunto traviesa-pivote

| Pieza | Cantidad | Referencia |
|----------------------|----------|---------------|
| Riostra | 2 | 00.457.04.047 |
| Refuerzo de traviesa | 2 | 00.457.04.046 |
| Nervio | 4 | 00.457.04.045 |
| Refuerzo extremo | 4 | 00.457.04.044 |
| Alma | 2 | 00.457.04.043 |
| Plataforma inferior | 1 | 00.457.04.042 |
| Plataforma superior | 1 | 00.457.04.041 |

3.2.2.2. Subconjunto larguero 1

Ambos subconjuntos de larguero están colocados uno en cada extremo del subconjunto de traviesa-pivote. El larguero estará colocado sobre los dos ejes paralelos de los juegos de ruedas, y aloja la suspensión primaria del vehículo, de manera que soporta las fuerzas debidas a las irregularidades de la vía, los desniveles del terreno, equilibrando los cambios inerciales de masa en paso

por curva, aceleraciones o deceleraciones. En la figura 3.21 se muestra el subconjunto larguero1 ensamblado.

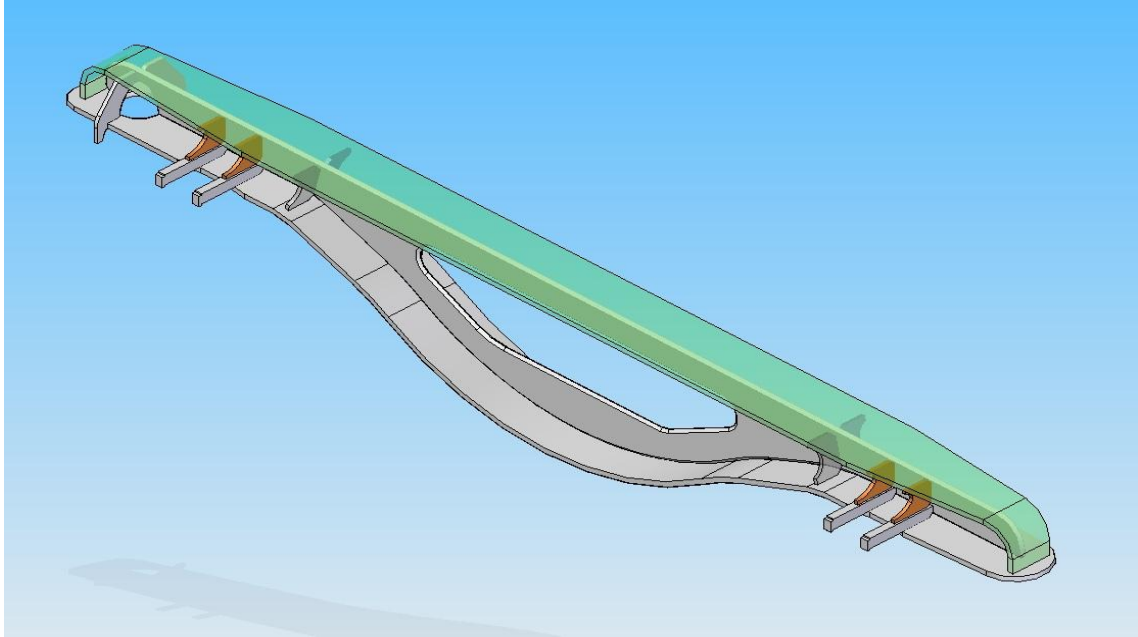


Figura 3.21. Subconjunto larguero1

El subconjunto del larguero 1 está compuesto por un total de 17 piezas. En la Tabla 3.2 se muestran las distintas piezas que forman el subconjunto. En la tabla 3.2 se muestran las distintas piezas que forman al subconjunto.

Tabla 3.2: Elementos del subconjunto larguero 1

| Pieza | Cantidad | Referencia |
|--------------------|----------|---------------|
| Refuerzo extremo | 2 | 00.457.04.034 |
| Conjunto limitador | 4 | 00.457.04.020 |
| Refuerzo limitador | 4 | 00.457.04.015 |
| Refuerzo alma | 4 | 00.457.04.014 |
| Alma | 1 | 00.457.04.033 |
| Ala inferior | 1 | 00.457.04.032 |
| Ala superior | 1 | 00.457.04.031 |

3.2.2.3. Subconjunto larguero 2

Simétrico al larguero 1, salvo por carecer del orificio con los refuerzos en uno de sus extremos, como se muestra en la Figura 3.22.

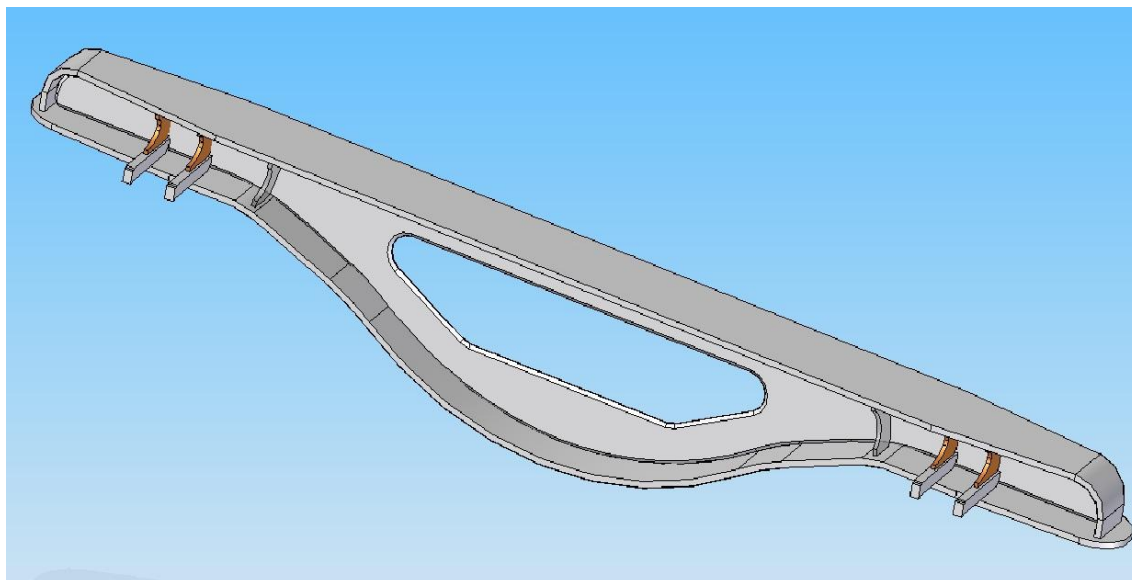


Figura 3.22. Subconjunto larguero2

El subconjunto de larguero 2 está compuesto por un total de 15 piezas. En la tabla 3.3 se muestran las distintas piezas que forman al subconjunto.

Tabla 3.3. Elementos del conjunto larguero 2

| Pieza | Cantidad | Referencia |
|--------------------|----------|---------------|
| Conjunto limitador | 4 | 00.457.04.020 |
| Refuerzo limitador | 4 | 00.457.04.015 |
| Refuerzo alma | 4 | 00.457.04.014 |
| Alma | 1 | 00.457.04.013 |
| Ala inferior | 1 | 00.457.04.012 |
| Ala superior | 1 | 00.457.04.011 |

En la figura 3.23 se muestra el ensamblado de todo el conjunto.

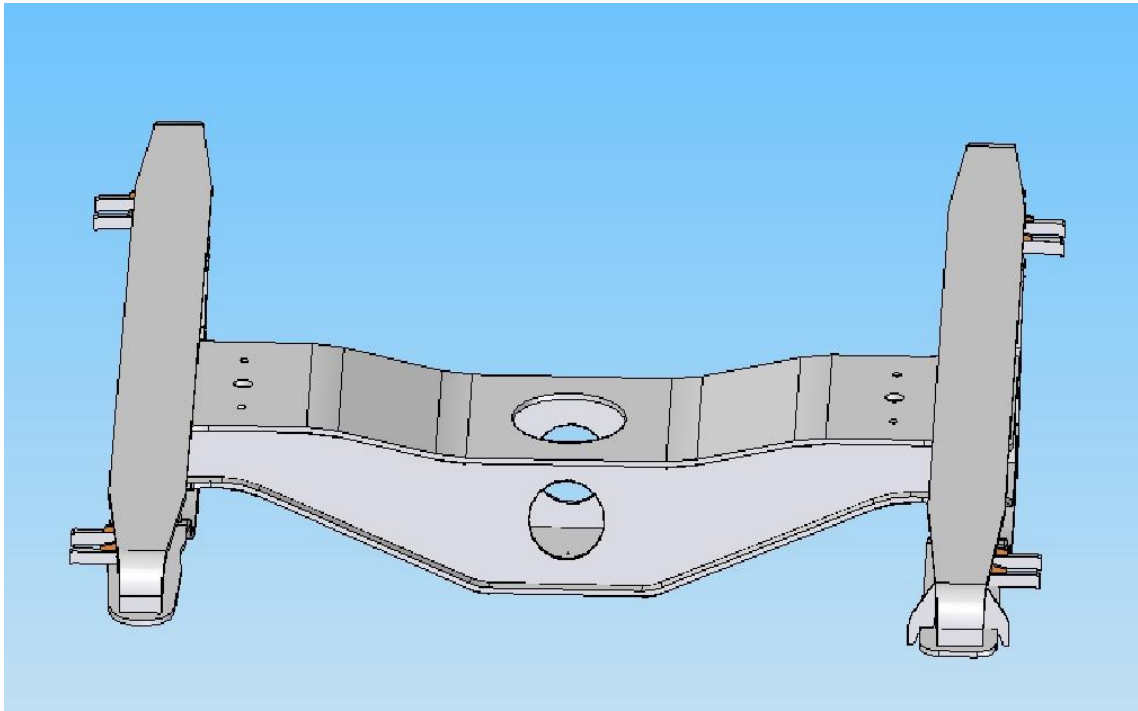


Figura 3.23. Alzado conjunto completo

En la figura 3.24 se muestra otra perspectiva del ensamblado de todo el conjunto.

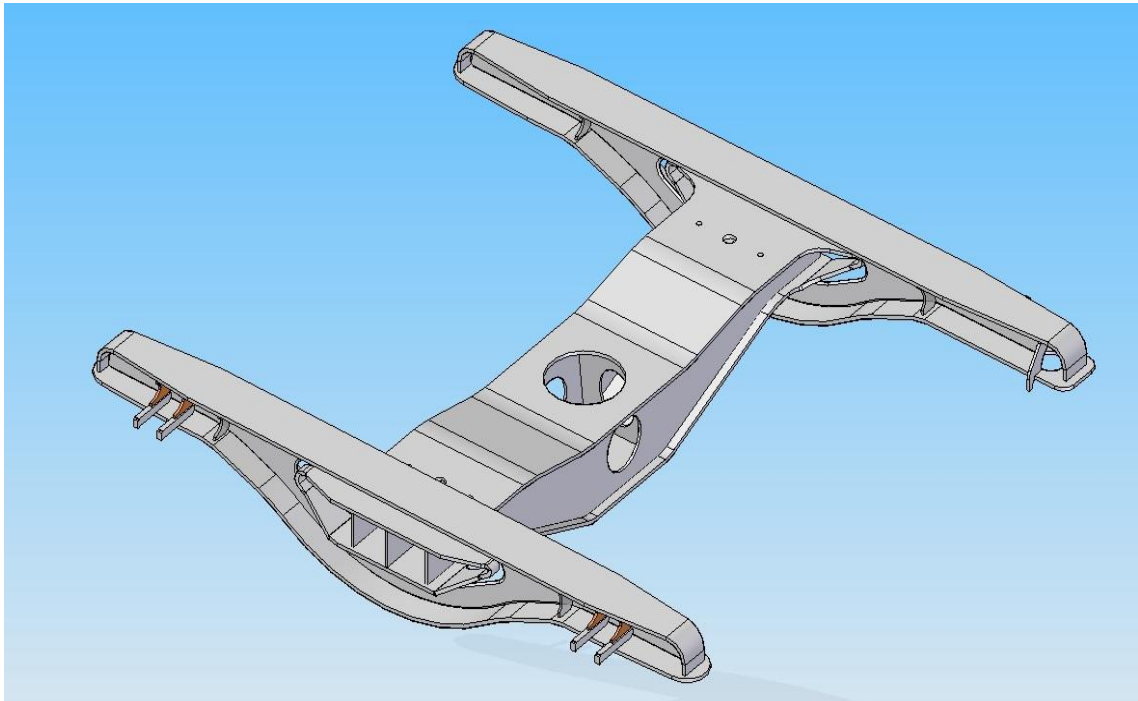


Figura 3.24. Conjunto completo

Capítulo 4. Obtención de las fuerzas soportadas por el bastidor en SimPack

Una pieza real de un vehículo ferroviario está expuesta a numerosas sollicitaciones, las cuales pueden llevar al fallo del componente.

En condiciones de trabajo, el bastidor se verá sometido a esfuerzos estáticos debidos a la carga que soporta, así como a esfuerzos dinámicos, estas cargas serán variables en función de las excitaciones producidas por las irregularidades en la vía, además de aceleraciones y cambios de trayectoria. También existen esfuerzos de fatiga por cargas cíclicas y una carga debida a al incremento de temperatura en el componente.

El objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Grado es el análisis de los esfuerzos en la suspensión del bogie. De modo que se estudia la reacción producida en el bastidor debido al trabajo de los amortiguadores y de los muelles de las suspensiones primaria y secundaria.

Mediante el programa SimPack, y a partir del modelo de un vehículo ferroviario creado por los alumnos de la universidad, se pueden hallar las fuerzas máximas aplicadas sobre las suspensiones del tren, variando parámetros de velocidad, excitación de la vía, trayectoria y peralte. Mediante este programa, se pueden hacer distintos ensayos con diferentes parámetros, intentando obtener condiciones críticas que puedan ser empleadas como valores adecuados en el ensayo estructural en PTC-Creo.

Se obtienen los valores de las fuerzas en los amortiguadores y en los muelles de las suspensiones primarias y secundarias, y se comparan las distintas situaciones. Se puede ver que los resultados más desfavorables para el vehículo se dan en vía con trayectoria curva y excitación aleatoria del sustrato. Los valores críticos de las fuerzas máximas serán los que se utilicen en el posterior ensayo estructural en PTC-Creo.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas. La Figura 4.1 muestra un gráfico con los valores de la fuerza en dirección X, aplicada en el amortiguador de la suspensión primaria del bogie. Se ve que el valor máximo oscila alrededor de cero y es despreciable en comparación con las demás fuerzas.

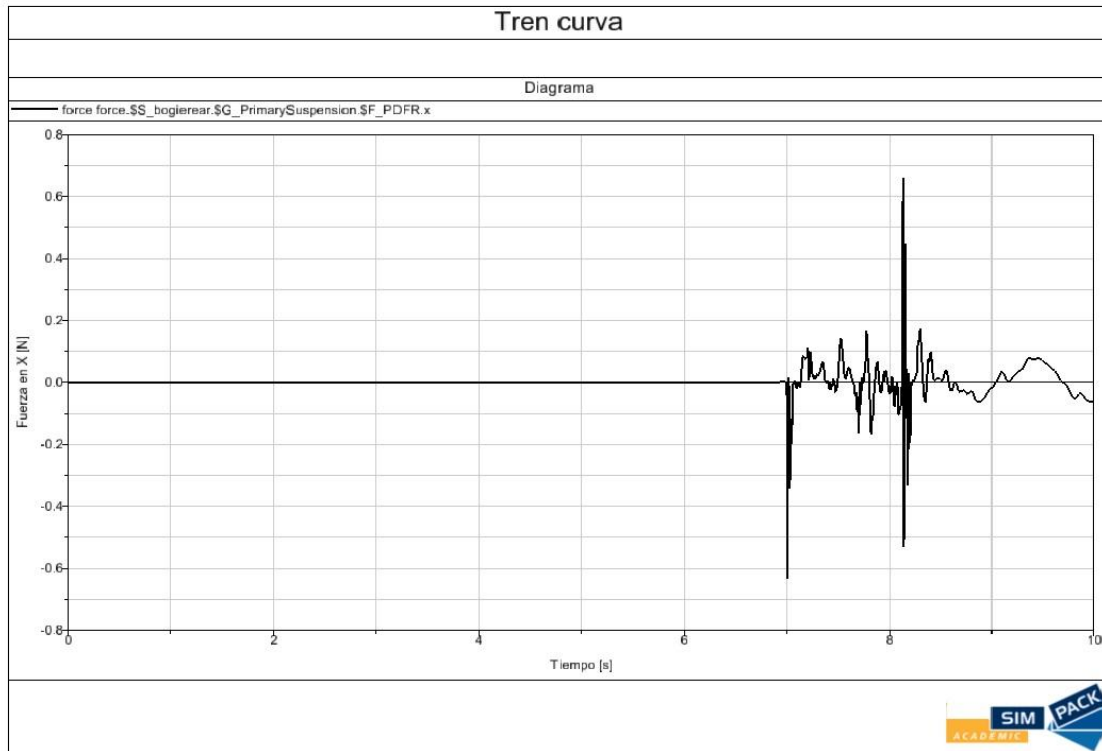


Figura 4.1. Fuerza en dirección X aplicada sobre el amortiguador de la suspensión primaria

En la Figura 4.2 se muestra el gráfico con los valores de la fuerza en dirección Y que actúa sobre el amortiguador de la suspensión primaria. El valor máximo de esta fuerza no supera los 10 N.

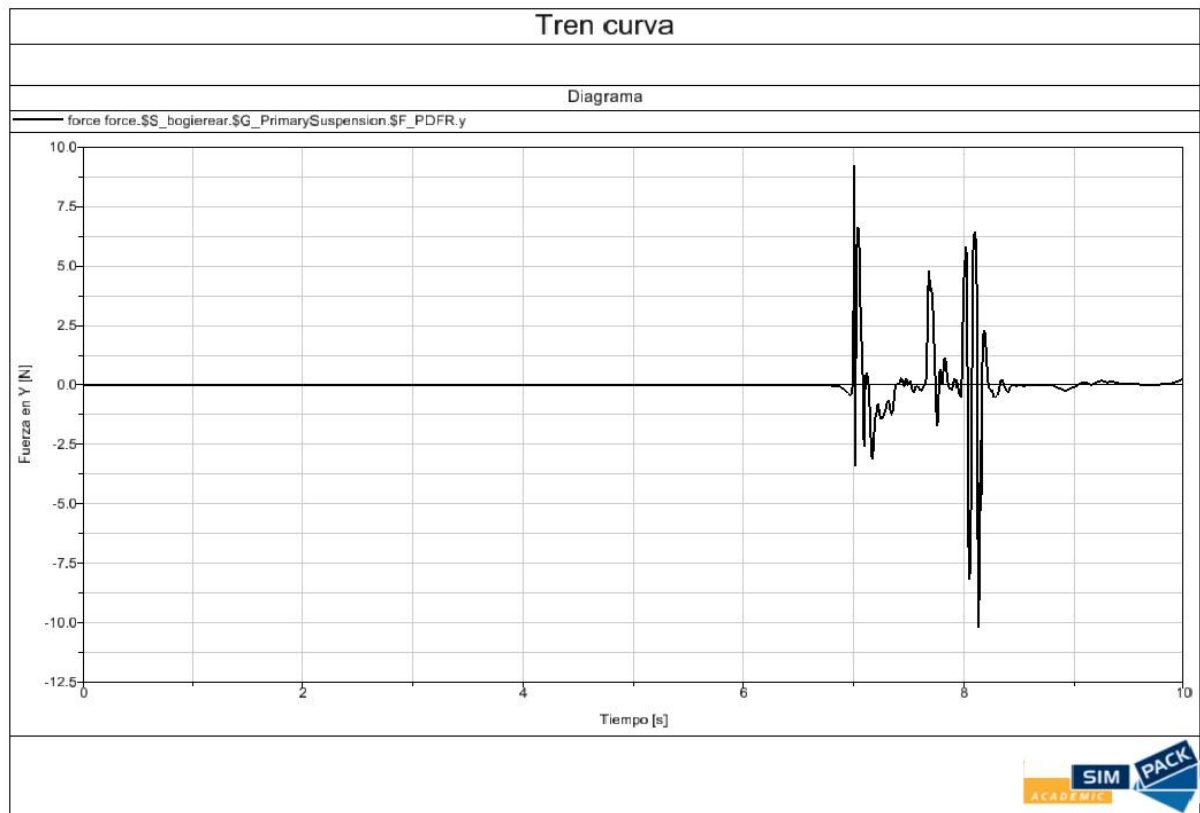


Figura 4.2 Fuerza en dirección Y aplicada sobre el amortiguador de la suspensión primaria

En la Figura 4.3 se puede observar la fuerza en dirección Z que soporta el amortiguador de la suspensión primaria. Los valores máximos de la fuerza oscilan alrededor de 500N. Aun siendo superior a los valores anteriores, se puede comprobar que, en comparación con los valores de la fuerza en los resortes de la suspensión, la fuerza soportada por los amortiguadores es despreciable a efectos prácticos.

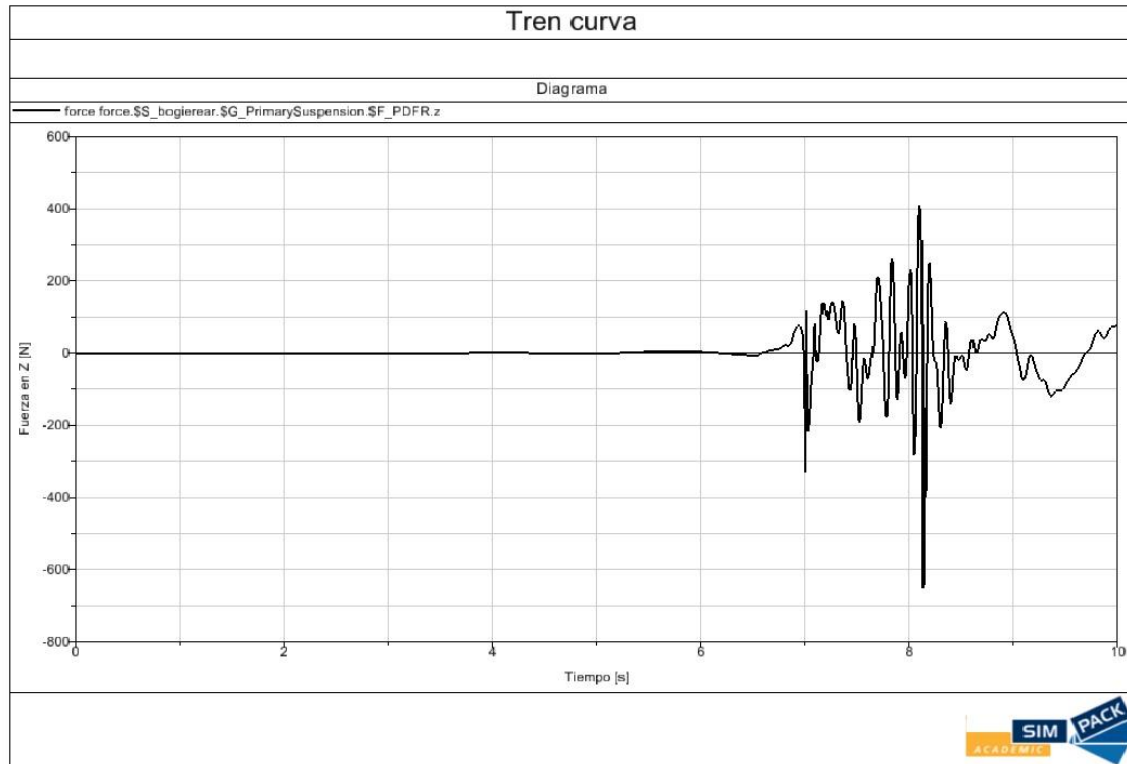


Figura 4.3. Fuerza en dirección Z aplicada sobre el amortiguador de la suspensión primaria

En la Figura 4.4 se muestra el gráfico de los valores de la fuerza en dirección X soportada por el resorte de la suspensión primaria. Se observa que esta fuerza es del orden de 10 veces mayor que la soportada en los amortiguadores de la suspensión primaria. El valor máximo de la fuerza en dirección X alcanza los 26KN.

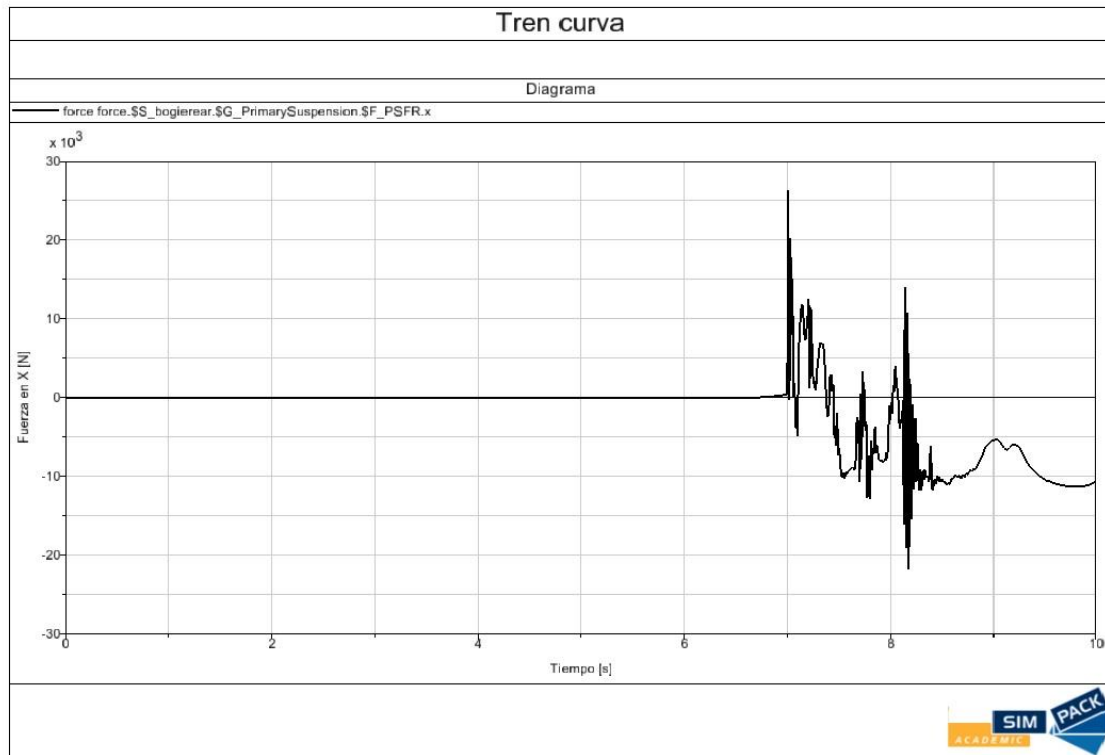


Figura 4.4. Fuerza en dirección X aplicada sobre el resorte de la suspensión primaria

En la Figura 4.5 se muestran los valores de la fuerza en dirección Y aplicada sobre el resorte de la suspensión primaria. Considerablemente superior a la fuerza aplicada en el amortiguador, el valor máximo de de la fuerza soportada por el resorte en dirección Y adquiere valores de 60 KN.

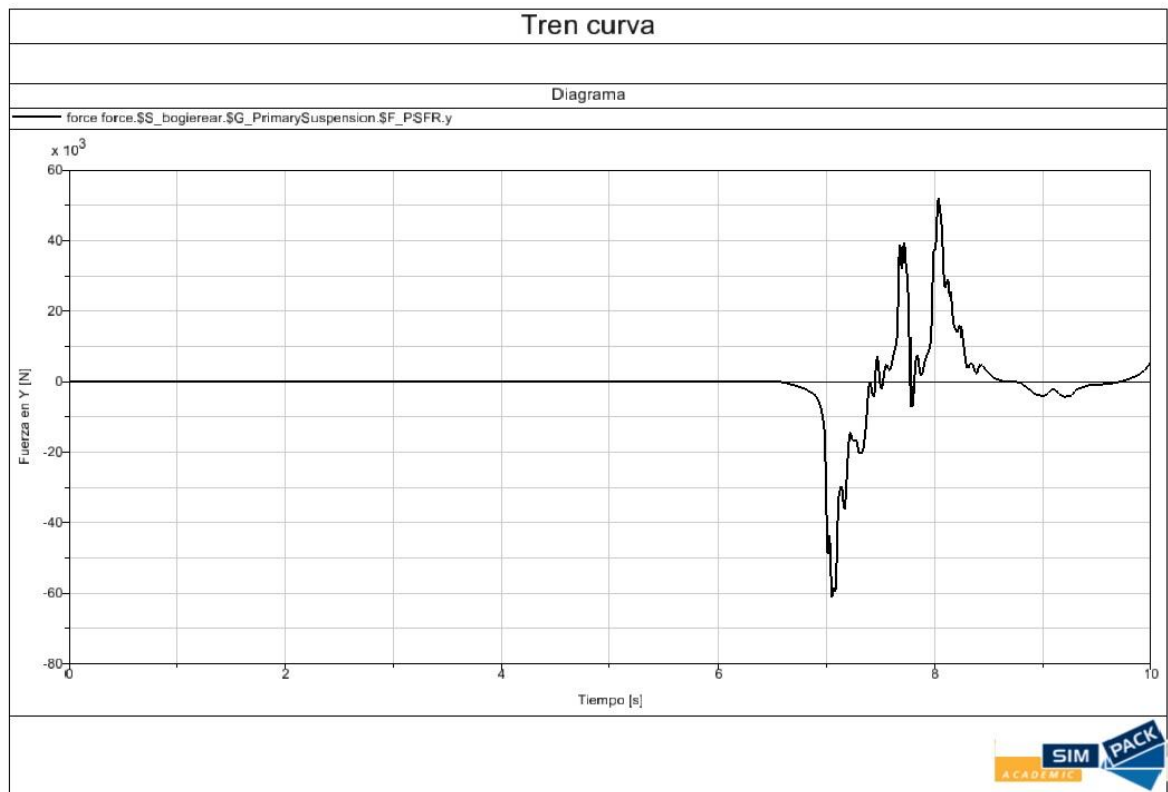


Figura 4.5. Fuerza en dirección Y aplicada sobre el resorte de la suspensión primaria

La Figura 4.6 muestra el gráfico con los valores obtenidos para la fuerza aplicada en dirección Z en los resortes de la suspensión primaria.

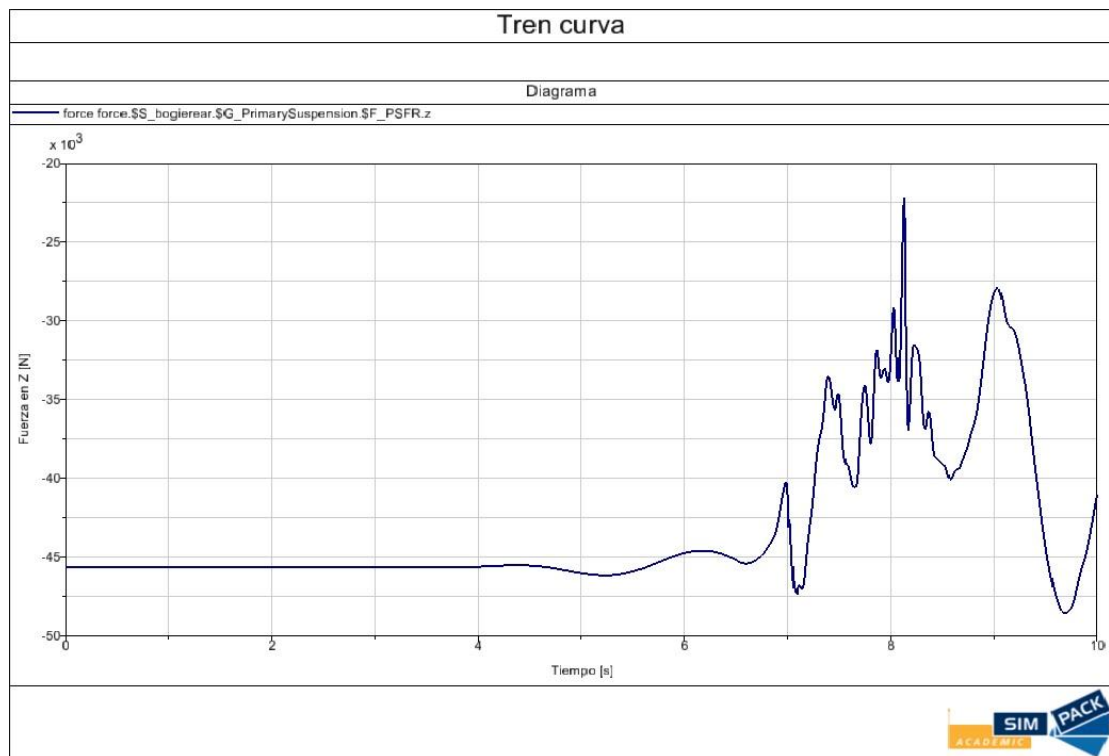


Figura 4.6: Fuerza en dirección Z aplicada sobre el resorte de la suspensión primaria

Se puede comprobar que la suspensión secundaria del vehículo responde del mismo modo que la suspensión primaria, apareciendo mayores valores de carga aplicada en los resortes que en los amortiguadores en ambos casos.

En la Figura 4.7 se muestran los valores de la fuerza en dirección X aplicada sobre el amortiguador de la suspensión secundaria, siendo el valor máximo inferior a 450N.

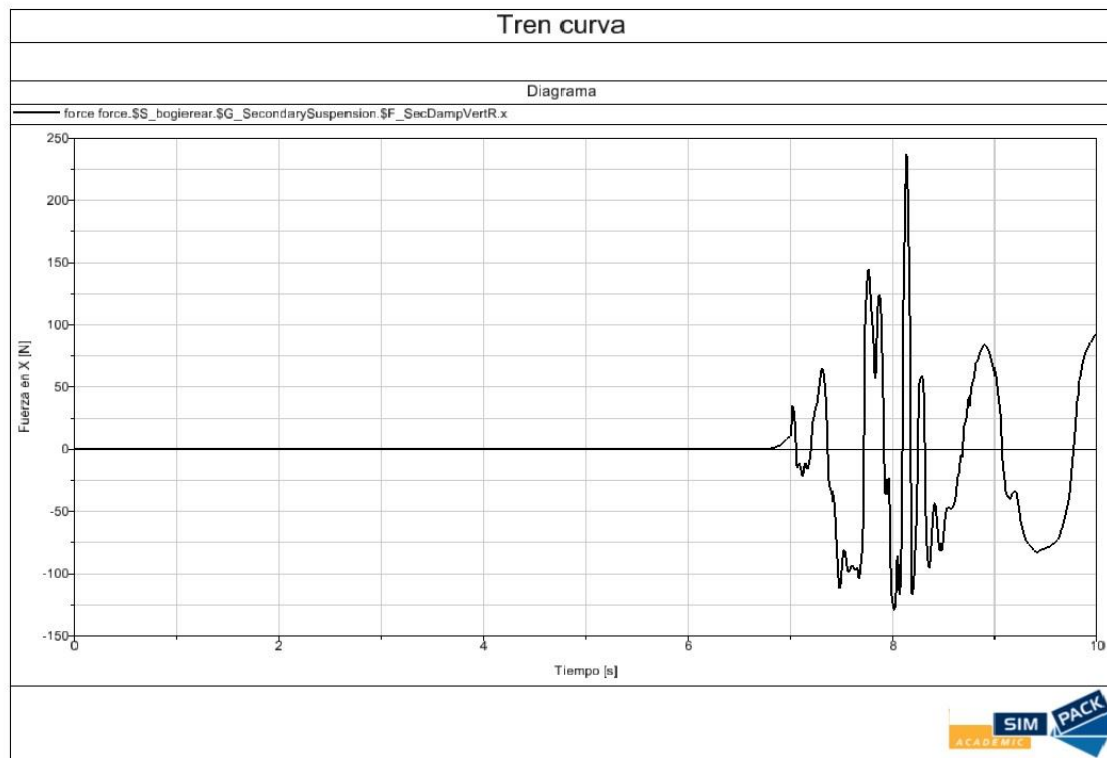


Figura 4.7. Fuerza en dirección X aplicada sobre el amortiguador de la suspensión secundaria

La Figura 4.8 muestra el gráfico con los valores de la fuerza en dirección Y que soporta el amortiguador de la suspensión secundaria.

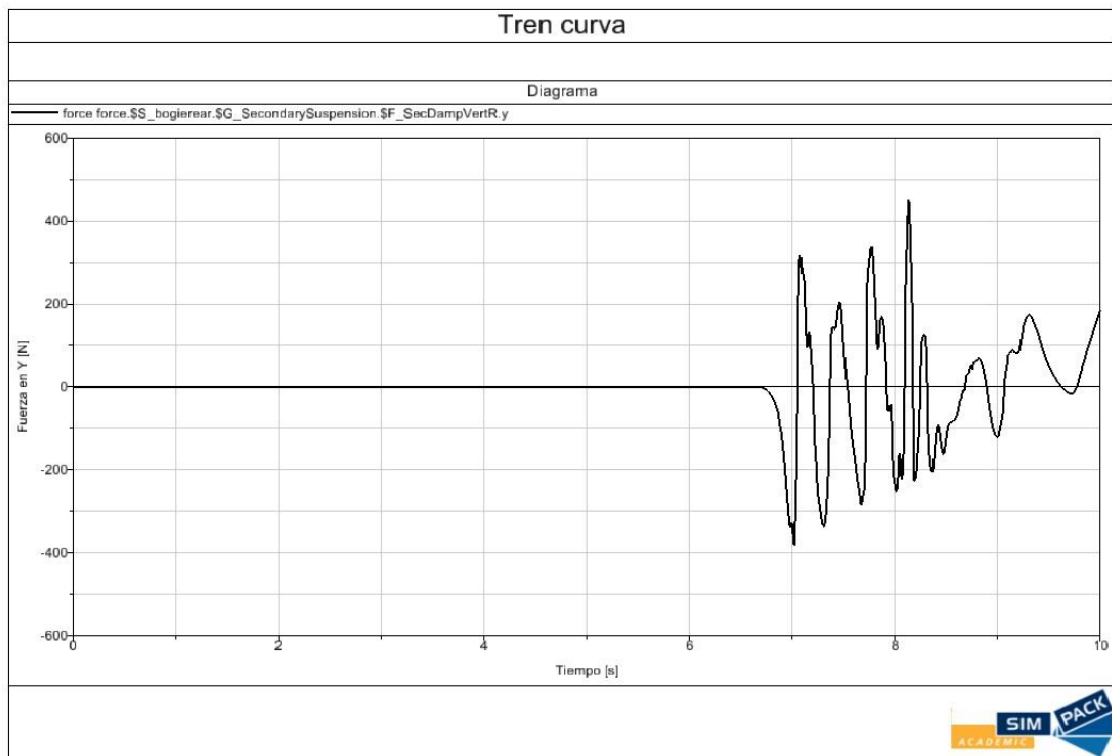


Figura 4.8. Fuerza en dirección Y aplicada sobre el amortiguador de la suspensión secundaria

Los valores de la fuerza en dirección Z que son soportados por el amortiguador de la suspensión secundaria son considerablemente superiores a los de las direcciones en X e Y, alcanzando 4.5 kN en su situación más desfavorable. Sin embargo, esa oscilación se produce unos segundos antes que cuando se alcanzan los valores más críticos de las fuerzas soportadas en los resortes. De manera que se puede simplificar el estudio tomando únicamente los valores obtenidos de las cargas en resortes. La Figura 4.9 muestra los valores de la fuerza en dirección Z del amortiguador de la suspensión secundaria.

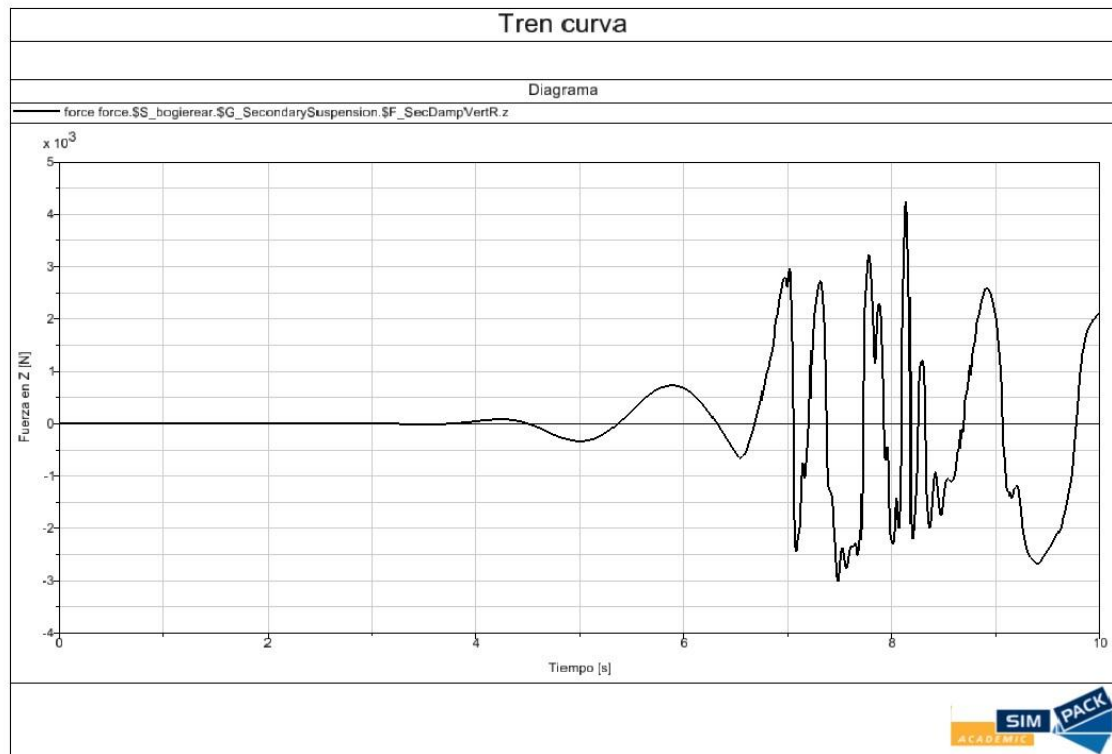


Figura 4.9. Fuerza en dirección Z aplicada sobre el amortiguador de la suspensión secundaria

A continuación se muestran los valores de las fuerzas aplicadas sobre el resorte de la suspensión secundaria, los cales, junto con las fuerzas aplicadas sobre los resortes de la suspensión primaria, serán los utilizados para el análisis estático del bastidor del bogie.

La Figura 4.10 muestra los valores de la fuerza en dirección X aplicada sobre el resorte de la amortiguación secundaria, con unos valores máximos de 4 kN.

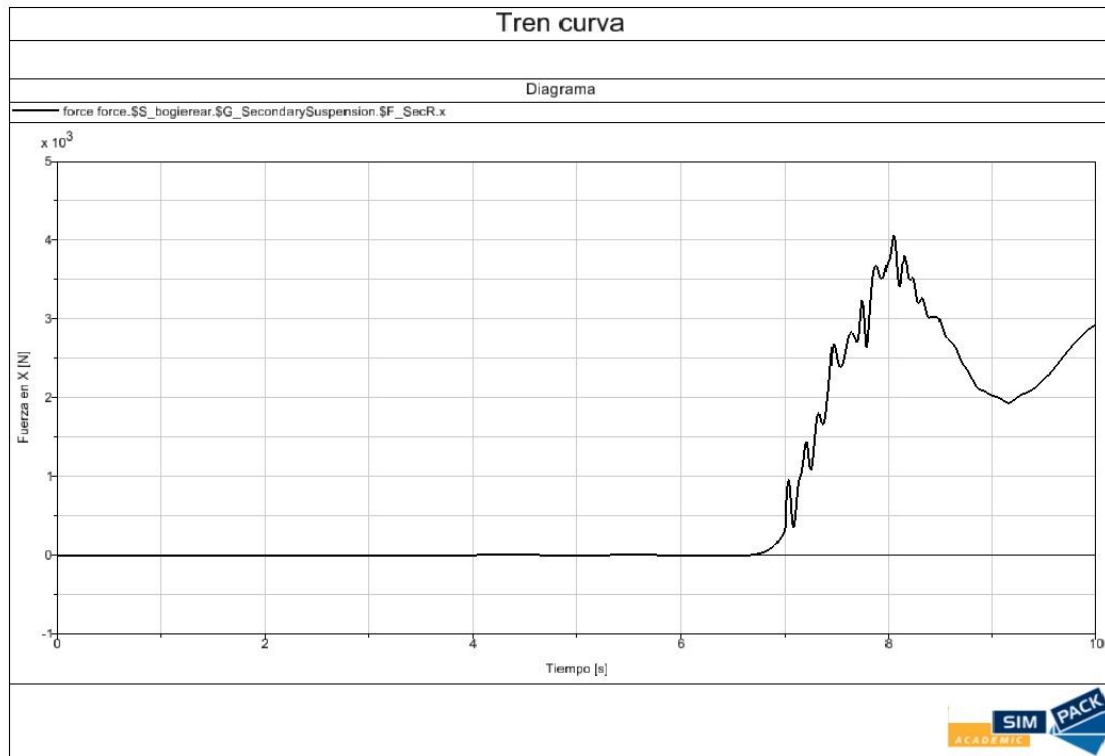


Figura 4.10. Fuerza en dirección X aplicada sobre el resorte de la suspensión secundaria

La Figura 4.11 muestra los valores obtenidos de la fuerza en dirección Y soportados por el resorte de la suspensión secundaria, con unos valores máximos que oscilan alcanzando los 11KN.

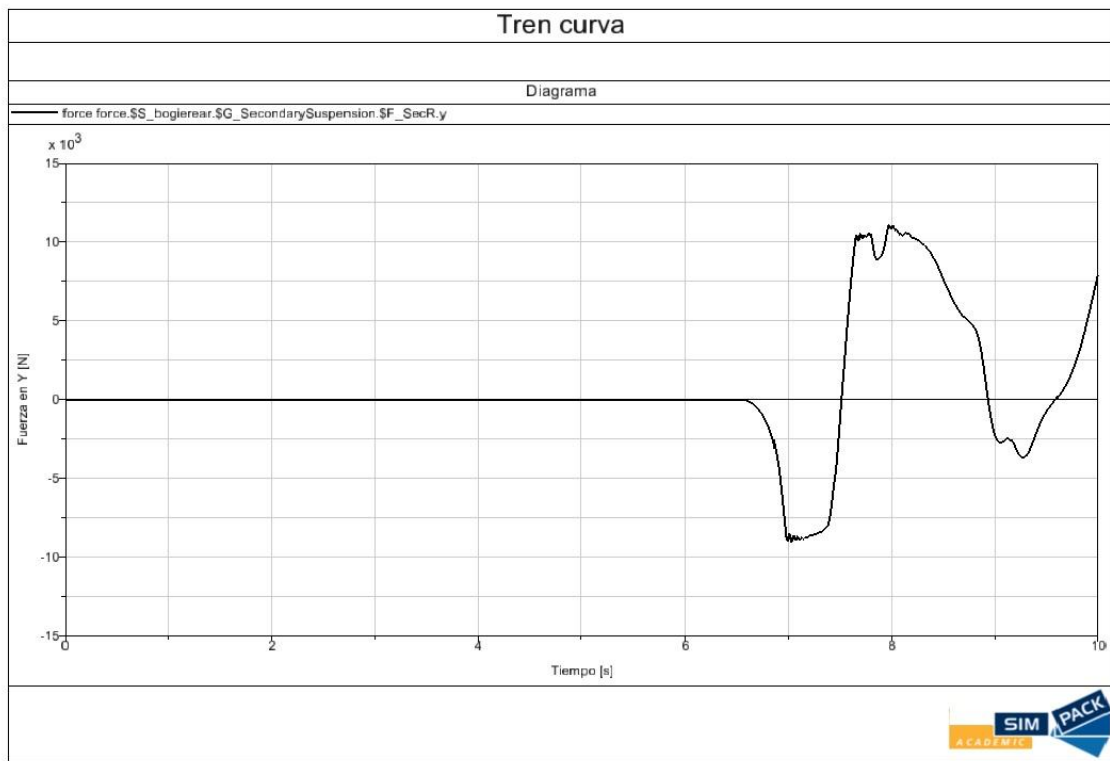


Figura 4.11. Fuerza en dirección Y aplicada sobre el resorte de la suspensión secundaria

En la Figura 4.12 se muestran los valores obtenidos para la fuerza en dirección Z soportada por el resorte de la suspensión secundaria. Los mayores valores alcanzados en esta sección son de 35KN.

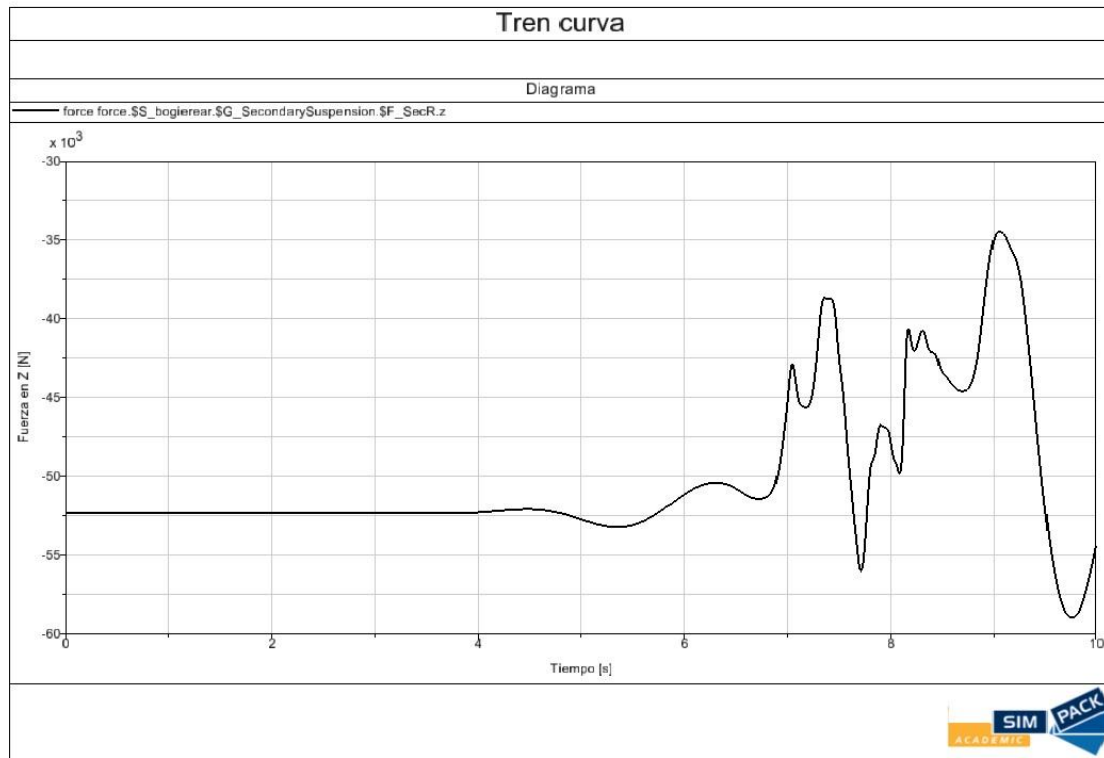


Figura 4.12. Fuerza en dirección Z aplicada sobre el resorte de la suspensión secundaria

En la Tabla 4.1 se muestran los valores máximos obtenidos.

Tabla 4.1. Fuerza máxima en las suspensiones primaria y secundaria

| | N | Amortiguador | Resorte |
|-----------------------|---|--------------|---------|
| Suspensión Primaria | X | 0 | 26 000 |
| | Y | 10 | 51 000 |
| | Z | 650 | 22 000 |
| Suspensión secundaria | X | 235 | 4 000 |
| | Y | 450 | 11 000 |
| | Z | 4 250 | 60 000 |

Como podemos comprobar, los valores de las fuerzas soportadas por los resortes son significativamente mayores a las aplicadas en los amortiguadores. Concluimos que las fuerzas en los amortiguadores serán despreciables frente a las de los resortes. En el análisis estructural de nuestro diseño consideraremos únicamente fuerzas en los resortes, tanto en la suspensión primaria, situada entre el conjunto de ejes y ruedas y el bastidor del bogie, así como en la suspensión secundaria, entre la propia caja del coche ferroviario y el bogie.

Capítulo 5. Importación a PTC-Creo

Creo es un software de diseño CAD 3D cuyas primeras versiones salieron al mercado en 2011. Una de las principales ventajas frente a otros programas CAD, y la razón por la que lo hemos elegido para nuestro estudio, es por la compatibilidad con otros programas, pudiendo así importar nuestro diseño en Solid Edge al Creo para hacer el análisis estructural.

Creo se compone de un grupo de tecnologías de vanguardia, AnyRole Aplicaciones Anymode Modelando Asamblea AnyBOM y AnyData Adopción. Creo se basa en el popular Pro / ENGINEER de PTC, CoCreate y software ProductView [10].

5.1. Conceptos teóricos

A continuación se explicarán algunos conceptos teóricos generales que empleamos en el análisis estructural objeto de nuestro estudio para ayudar a interpretar su aplicación y sus resultados.

Mediante el análisis de esfuerzos podemos determinar la resistencia de un elemento de nuestro vehículo sometido a cargas externas y evaluar su efecto sobre nuestro elemento, ya que cargas externas originan esfuerzos internos que pueden provocar que un componente falle.

Se suelen estudiar el análisis estructural y el análisis de esfuerzos como dos temas separados, de manera que el análisis estructural se refiere al cálculo de sistemas de fuerzas internas, y el análisis de esfuerzos es concerniente a los correspondientes esfuerzos internos generados y asociados con deformaciones. Inevitablemente cada uno de estos conceptos involucra al otro, de manera que se deben asumir como un conjunto.

El análisis estructural es probablemente la aplicación más común del método de elementos finitos, siendo aplicable tanto a estructuras civiles como puentes y edificios, como a estructuras navales o aeronáuticas, así como a componentes mecánicos. En nuestro estudio, haremos un análisis estático del bastidor del bogie que hemos diseñado en CAD anteriormente para comprobar su comportamiento ante solicitaciones externas.

Un análisis estático tiene como objeto de estudio el cálculo de desplazamientos, esfuerzos, giros y demás magnitudes, siempre bajo condiciones de carga estática. Llevándose a cabo este estudio para aquellas situaciones en las que nuestro vehículo no está en movimiento.

Criterios de plastificación

A la hora del diseño de un elemento, debemos cerciorarnos de que nuestro diseño va a aguantar las solicitaciones a las que previsiblemente se va a ver sometido sin que en él se produzca un deterioro que pueda conducir al fallo de la estructura. Mediante el criterio de Von Mises, podemos obtener una previsión del inicio de la fluencia en materiales dúctiles.

El criterio de Von Mises, también llamado criterio de la máxima energía de distorsión, es un criterio de resistencia estática, aplicado a materiales dúctiles, según el cual, el material no fluirá en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción. La energía de distorsión es la energía consumida para obtener un cambio de forma del punto elástico sin cambio de dimensiones ni de volumen [12].

El criterio de Von Mises se escribe matemáticamente como:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} < S_y$$

Donde:

- σ_1, σ_2 y σ_3 son las tensiones principales
- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$
- $S_y > 0$ es el límite de fluencia a tracción

El coeficiente de seguridad en el punto analizado, de acuerdo con el criterio de Von Mises se obtiene de la expresión:

$$n_s = \frac{S_y}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}}$$

Donde:

- σ_1, σ_2 y σ_3 son las tensiones principales
- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$
- $S_y > 0$ es el límite de fluencia a tracción
- n_s es el coeficiente de seguridad

Expresión válida para cualquier signo de las tensiones principales.

En el caso del estado tensional biaxial, el criterio de Von Mises puede representarse gráficamente en un diagrama $\sigma_A - \sigma_B$, donde éstas representan las dos tensiones principales no nulas, como se indica en la figura. Como se puede ver en la Figura .1, la zona sombreada representa la zona segura, para la cual el material no fluye de acuerdo con dicho criterio.

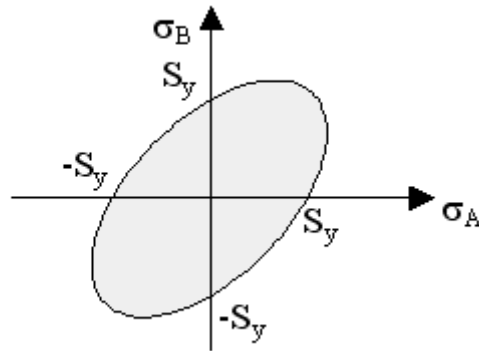


Figura 5.1.Lugar de Plastificación según Criterio Von Mises

5.2. Primeros ensayos

Con el diseño en SolidEdge, se procede a llevar a cabo el análisis en el programa PTC-Creo. Como prometía este nuevo programa, la importación se realiza con éxito, pero el programa muestra un diagnóstico de fallo catastrófico tras el análisis que no podemos identificar. A continuación se explican los pasos seguidos en el análisis en PTC-Creo.

En primer lugar, es necesario asignar material al conjunto. En la Figura 5.2 se puede observar el modelo al asignar acero como material.

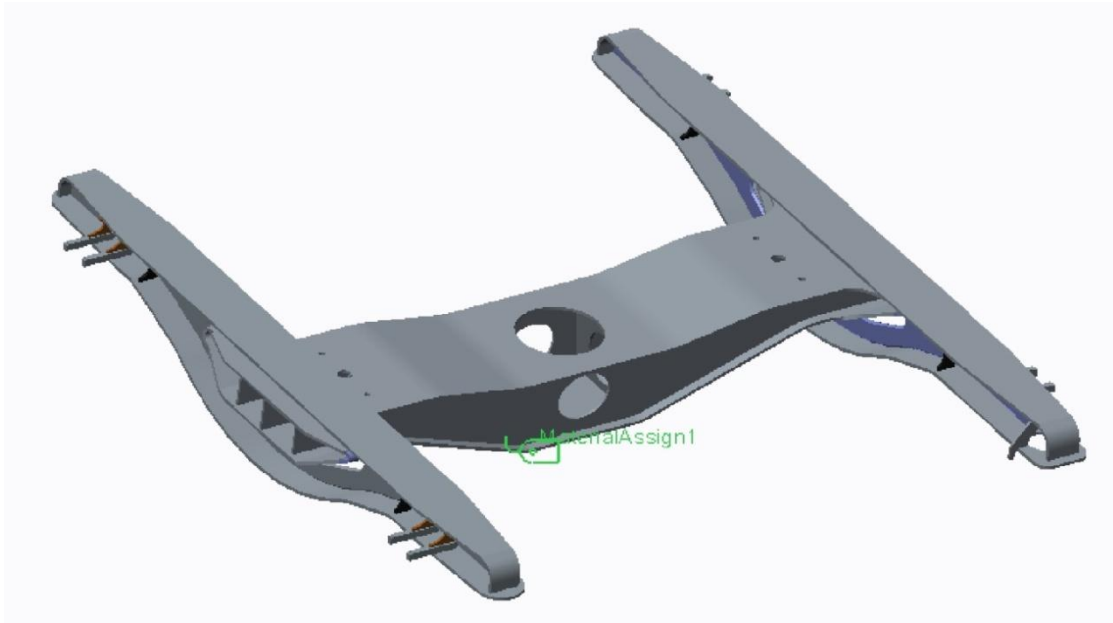


Figura 5.2. Asignación de material

Tras asignar material, se establecen restricciones al bastidor y se aplican fuerzas aleatorias para ver su comportamiento. En la Figura 5.3 se muestra el modelo en PTC-Creo Simulate tras haber realizado las restricciones y aplicado las cargas al bastidor.

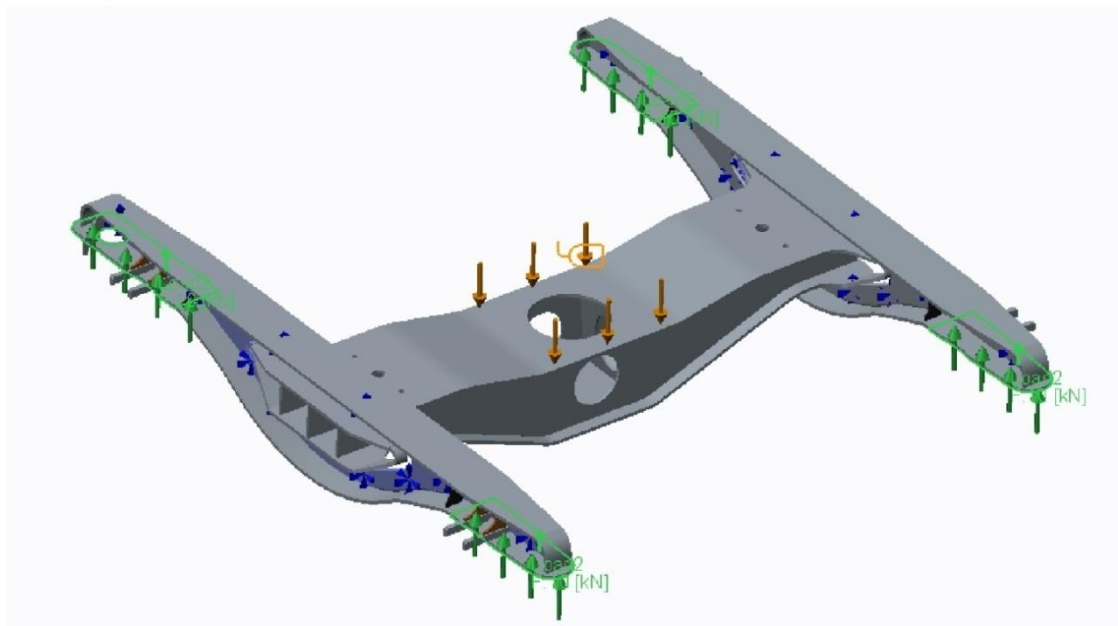


Figura 5.3. Restricciones y aplicación de cargas al modelo

Una vez elegidas las condiciones de contorno y las fuerzas aplicadas, se puede comenzar el análisis estático del conjunto. Como se puede observar en la Figura 5.4, el análisis estático da fallo en nuestro en el modelo.

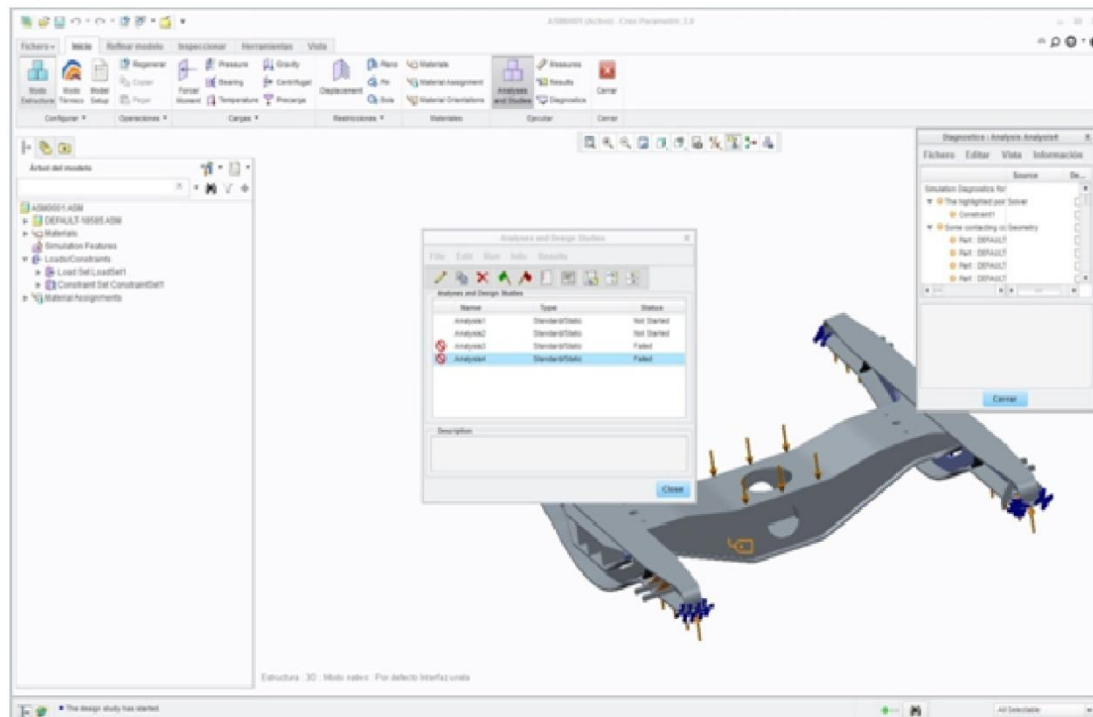


Figura 5.4. Fallo en el análisis estático

En la Figura 5.5 se puede ver como el programa nos indica fallo en el diseño relacionado con las restricciones internas de algunas de las piezas más pequeñas del conjunto, las cuales no están sometidas a esfuerzos.

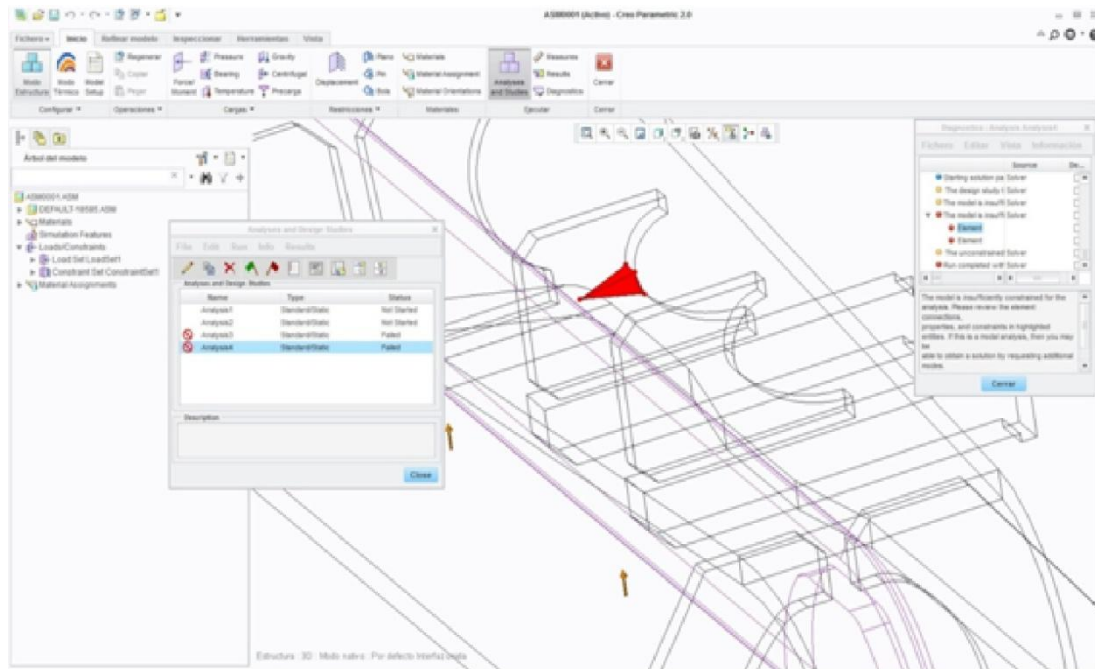


Figura 5.5.Diagnóstico de fallo en geometría interna

Al no ser posible identificar el fallo, se llega a la conclusión de que puede deberse a que el ensamblado y la relación entre las distintas piezas del conjunto es demasiado compleja para llevar a cabo el análisis, o bien, la tolerancia empleada en el programa SolidEdge no es compatible con la que aporta el nuevo software Creo.

Como primera solución, se simplificar el conjunto, para facilitar las uniones entre piezas, eliminando bordes con redondeos y acuerdos. En las figuras 5.6 y 5.7 se puede observar una de las piezas con bordes redondeados y su posterior simplificación.

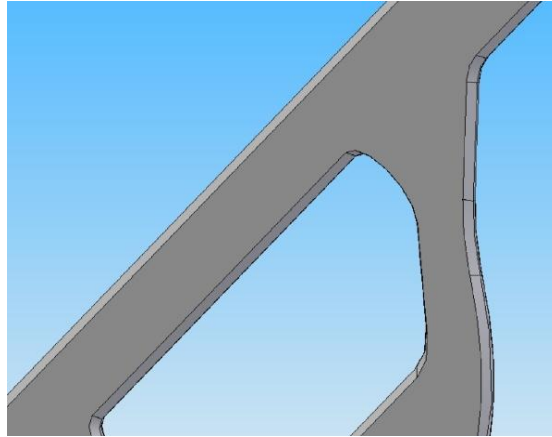


Figura 5.6. Pieza original con bordes redondeados

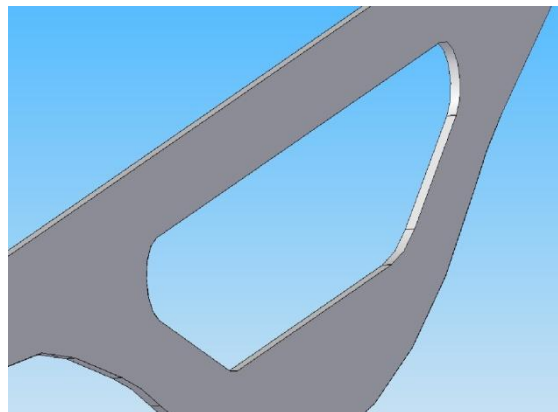


Figura 5.7. Pieza modificada

Se vuelve a realizar el ensamblado, simplificando las piezas y eliminando las que generan problemas. Además, se hace un rediseño, ajustando el original, para obtener un conjunto más rígido, de modo que se modifica significativamente el valor de las medidas iniciales aportadas por los planos utilizados de partida.

5.3. Rediseño

Como se ha expuesto anteriormente, el primer análisis del bastidor no cumple con los requerimientos geométricos necesarios para su ensayo, de manera que se procede a hacer un rediseño del bastidor del bogie.

Tomando como base el diseño original, las mejoras que llevadas a cabo se limitan a una simplificación del modelo. En primer lugar, se eliminan los redondeos de los bordes de las piezas, con lo que obtiene mayor área de contacto entre los distintos elementos durante su ensamblado y facilita las relaciones internas entre piezas del conjunto.

Tras hacer el montaje inicial de las piezas del bastidor, se puede comprobar que algunas de las medidas aportadas por los planos de la estructura entraban en conflicto con otras, generando cierto error en el ensamblaje. De modo que se revisa el diseño y se ajustan las medias, cambiando los datos originales, para elaborar un modelo de bastidor más rígido y de menores tolerancias. En la Figura 5.8 se muestra cómo se edita una de las piezas en el programa SolidEdge.

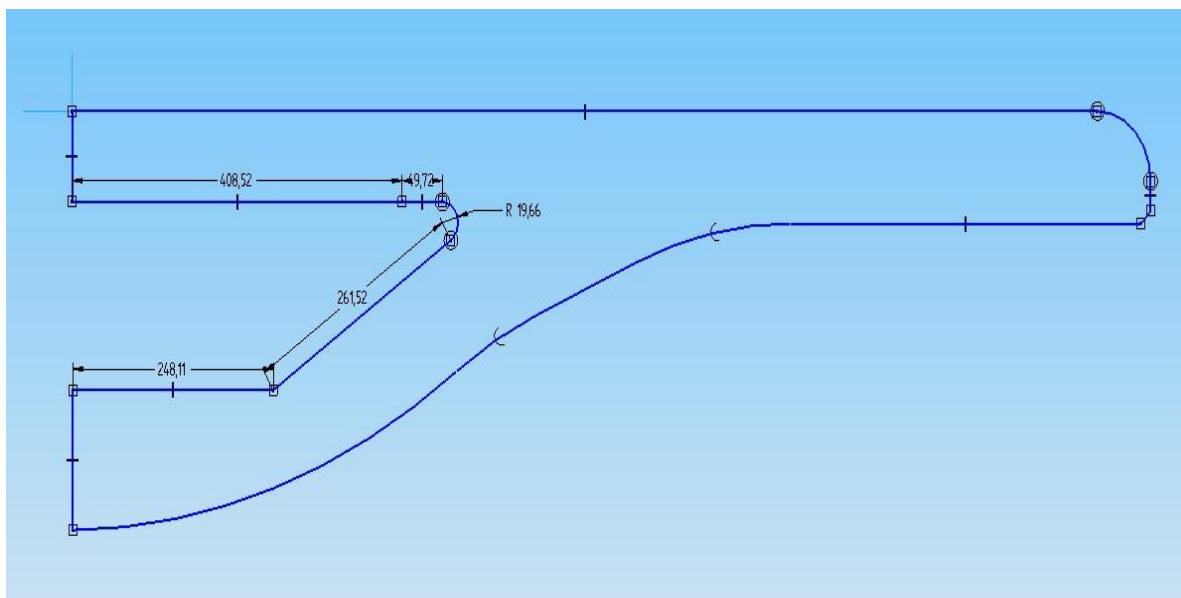


Figura 5.8. Modificación en SolidEdge de una de las piezas del bastidor

Como se muestra en la Figura 5.9, las modificaciones realizadas hacen que las piezas ajusten mejor unas con otras en el ensamblado.

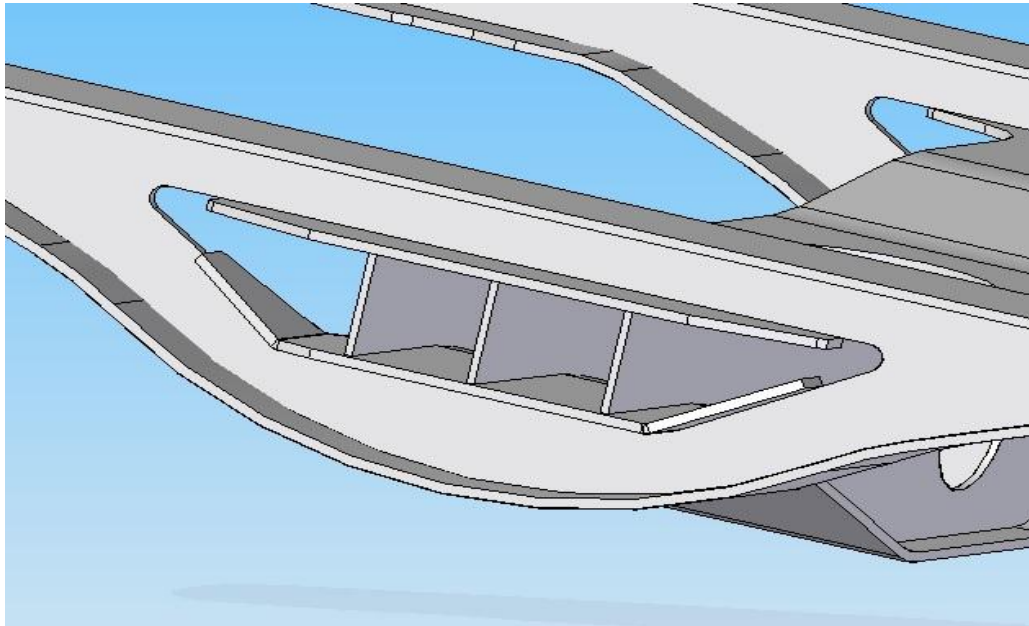


Figura 5.9. Ensamblado con piezas modificadas

Otra de las medidas tomadas en el nuevo diseño del bastidor es prescindir de aquellas piezas que no aportan valor a la estructura, de manera que eliminaremos del conjunto los elementos de refuerzo, ya que en el anterior diseño han sido uno de los focos del fallo y parece no ser necesario su empleo a priori.

El conjunto resultado tras las medidas de rediseño, sobre el cual se lleva a cabo posteriormente el estudio estático, se muestra a en la Figura 5.10.

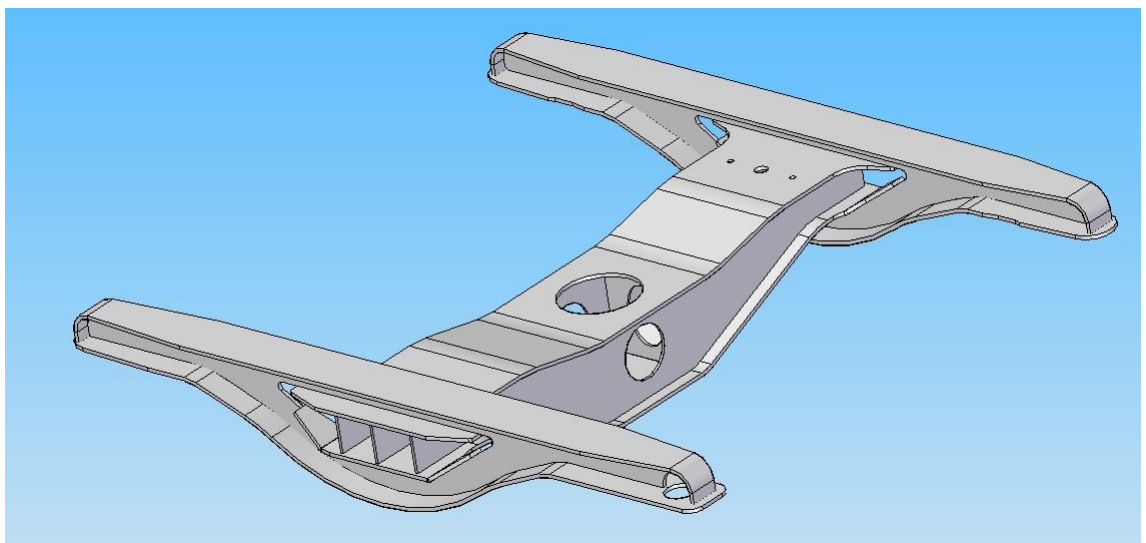


Figura 5.10. Conjunto modificado

5.4. Importación a PTC-Creo

En esta sección se procede a la importación del diseño modificado en el programa PTC-Creo Simulate para su análisis.

Para realizar el estudio del bastidor, hay que dar al modelo propiedades de masa. Como se hizo en el primer análisis, se elige el acero como material para la estructura. El acero, por su elevado límite elástico, es ampliamente usado en vehículos ferroviarios. Se trata de un material dúctil que se ajusta muy bien al criterio de plastificación de Von Mises. En la Figura 5.11 se muestra el modelo tras la asignación de material.

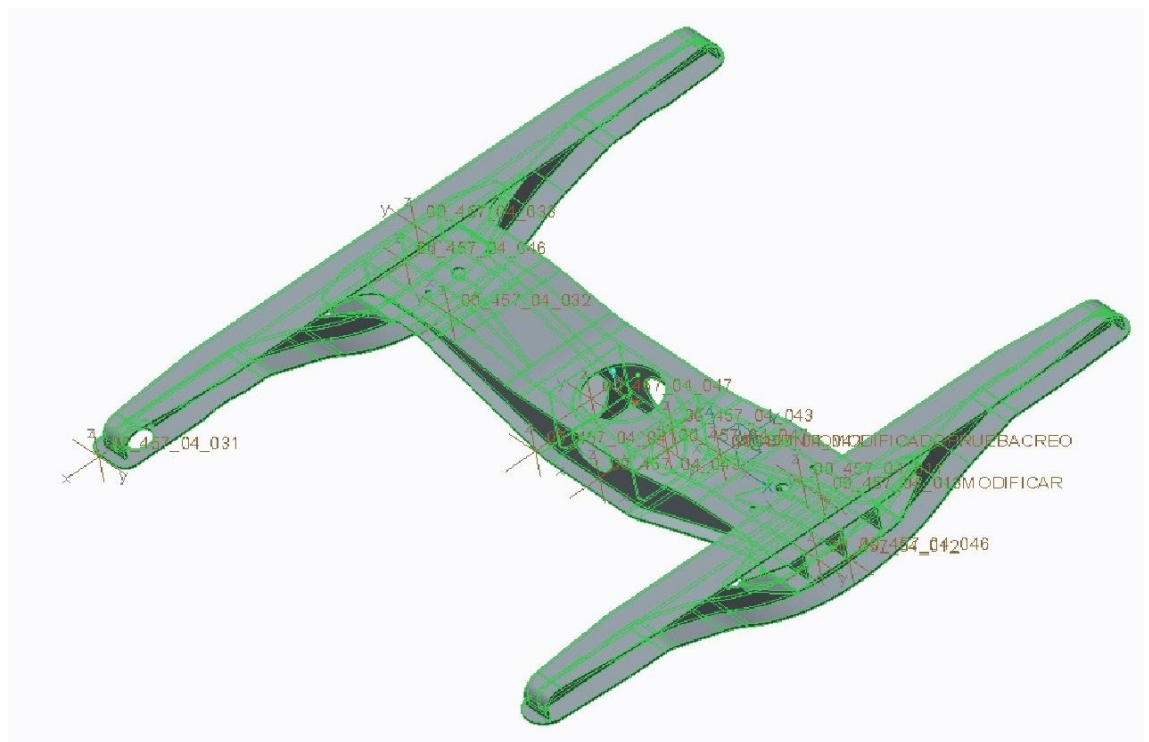
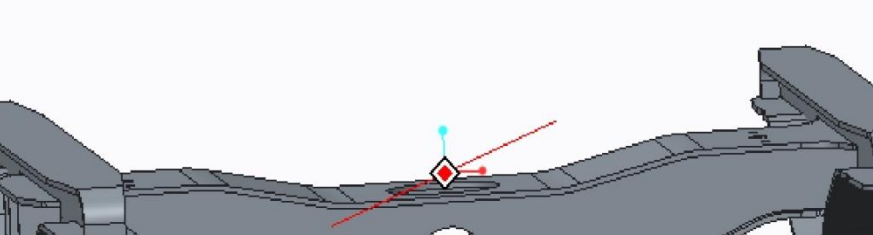


Figura 5.11. Asignación de Material



A 3D model of a mechanical part, possibly a bracket or a support arm, is shown. The part is gray and has a central circular hole. A coordinate system (WCS) is defined at the bottom center of the part, with the Z-axis pointing upwards and the X-axis pointing to the right. A red line with a diamond-shaped feature is located on the top surface of the part, near the center. An orange feature, possibly a slot or a hole, is located on the left side of the part.

El bastidor es la estructura principal del bogie que soporta la carga del vehículo. La parte superior del bogie va unido a la caja por diferentes elementos de sujeción, entre los cuales se cuenta la suspensión secundaria, colocada en el centro del conjunto traviesa-pivote. Por otro lado, la estructura del bogie descansa sobre los ejes de los juegos de ruedas, que van unidos firmemente junto con la suspensión primaria en cada una de las ruedas, a los largueros del bastidor.

En la figura 5.13 se pueden observar las restricciones aplicadas al bastidor en color azul.

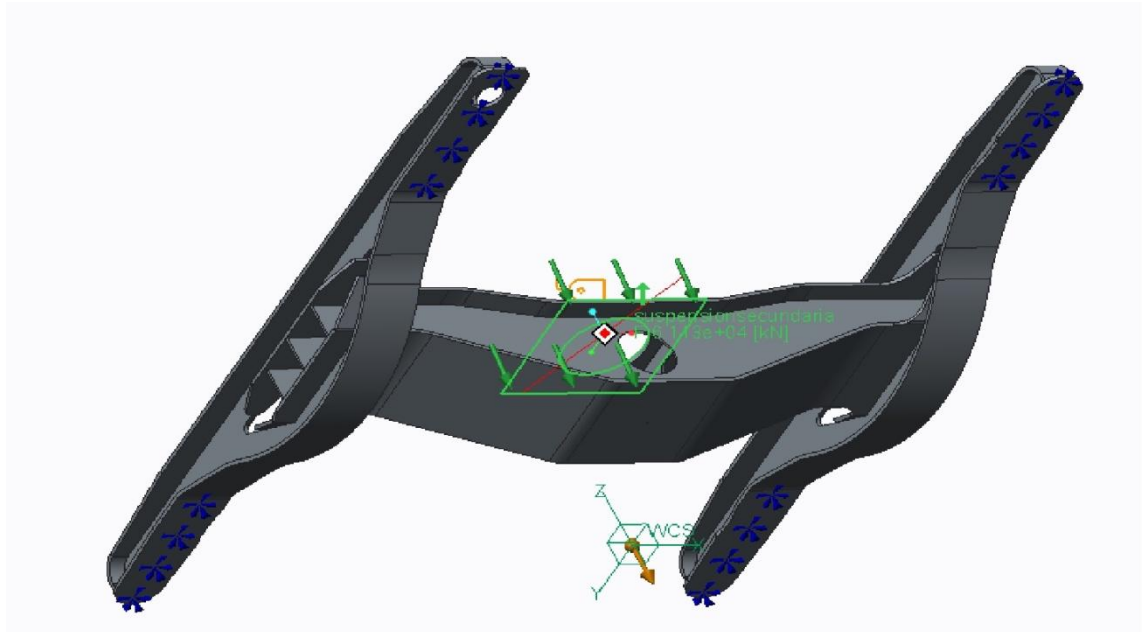


Figura 5.13. Restricciones al Movimiento

Las cargas son aplicadas en las áreas de la estructura donde se encuentra la suspensión secundaria, por ser la parte que conecta con la caja del vehículo y que soporta su peso.

Los valores la carga aplicada son los obtenidos anteriormente en el programa SimPack, en el cual se simula el paso de un vehículo ferroviario por una vía de trayectoria curva y con oscilaciones aleatorias del terreno. Mediante la simulación en SimPack, se obtiene una previsión de los esfuerzos soportados por la suspensión del tren, y se concluye que los esfuerzos en los resortes de de las suspensiones primaria y secundaria son mucho mayores que las soportadas por los amortiguadores. En consecuencia, el estudio estático contemplará la aplicación de las cargas en los resortes de las suspensiones primaria y secundaria en las condiciones de funcionamiento más adversas.

Se aplica carga en el área de la estructura donde se encuentra la suspensión secundaria , con valores de las componentes en las direcciones XYZ.

La tabla 5.1 muestra los valores de las fuerzas aplicadas en la suspensión secundaria.

Tabla 5.1.Fuerza aplicada en la suspensión secundaria

| | | |
|-----------------------|---|---------|
| Suspensión secundaria | X | 4 000 |
| | Y | 11 000 |
| | Z | -60 000 |

En la figura 5.14 se muestra la aplicación en el programa PTC-Creo, de cargas sobre el área donde se encuentra la suspensión secundaria.

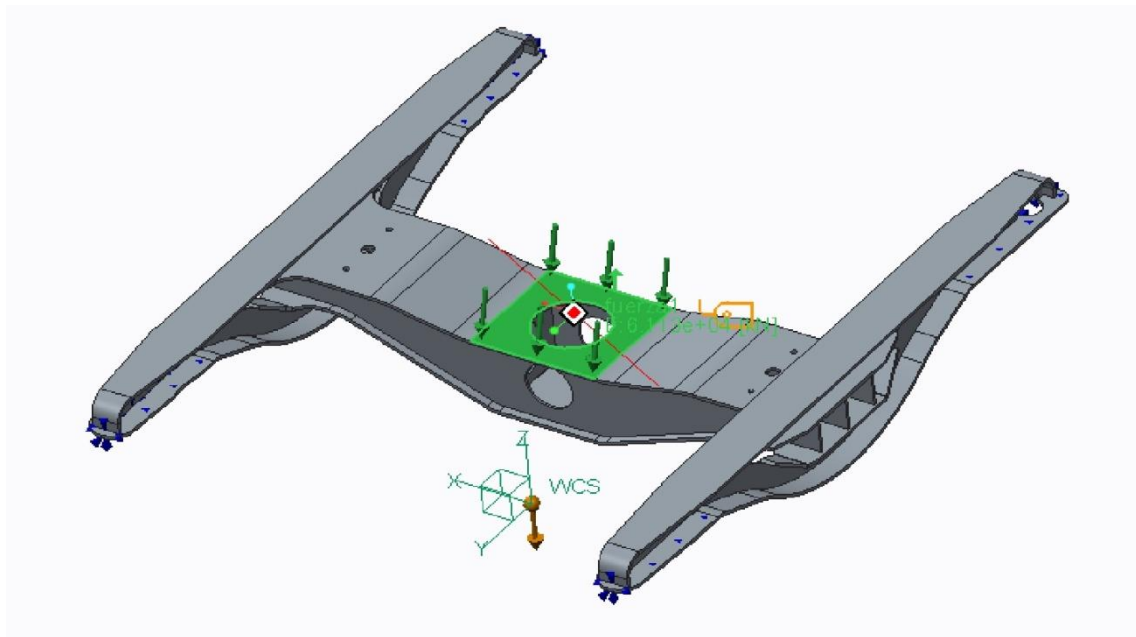


Figura 5.14. Fuerzas aplicadas en la suspensión secundaria

La carga soportada por la suspensión primaria será aplicada en la parte superior de los largueros. En la tabla 5.2 se muestran las distintas componentes de la fuerza aplicada en la suspensión primaria.

Tabla 5.2. Fuerza en la suspensión primaria

| | | |
|---------------------|---|--------|
| Suspensión primaria | X | 26 000 |
| | Y | 51 000 |
| | Z | 22 000 |

La figura 5.15 muestra la aplicación de carga en las áreas del modelo donde se encuentra la suspensión primaria.

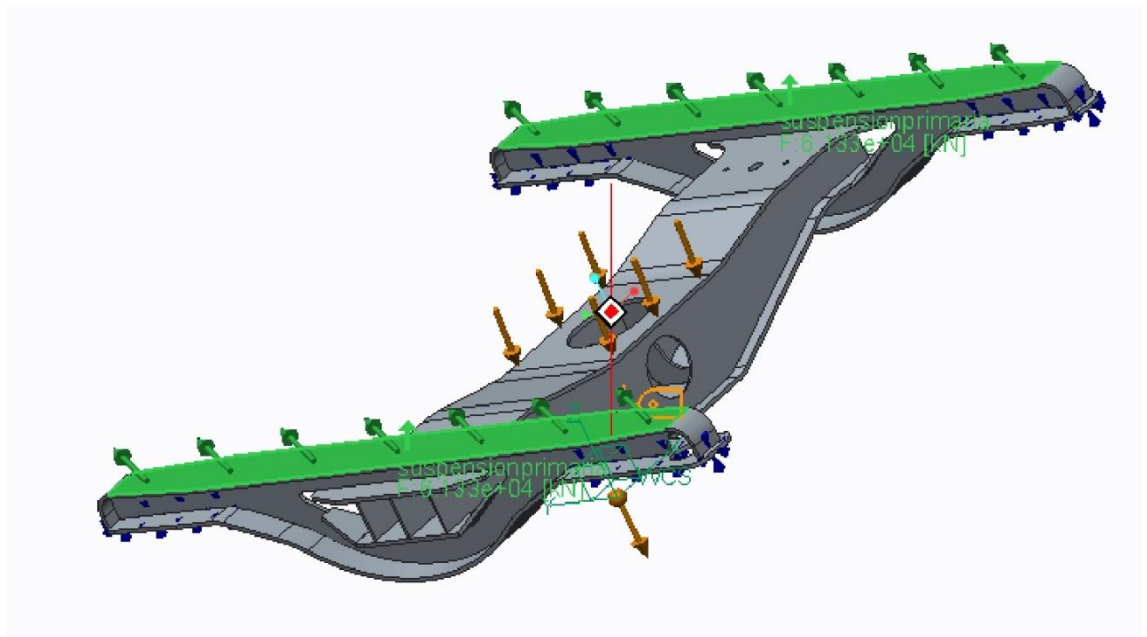


Figura 5.15.Fuerza aplicada en la suspensión primaria

Como se puede apreciar, las cargas aplicadas en la suspensión primaria toman la orientación característica del paso por curva, desplazando los pesos del vehículo hacia el exterior de la trayectoria a causa de la fuerza centrífuga.

Capítulo 6. Resultados

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en el análisis estático en el programa PTC-Creo.

El diagnóstico obtenido en PTC-Creo valida la geometría del conjunto, dando paso al cálculo de los resultados. En la figura 6.1 se muestra la ventana de diagnóstico obtenida en PTC-Creo, la cual valida el análisis y da paso a los resultados.

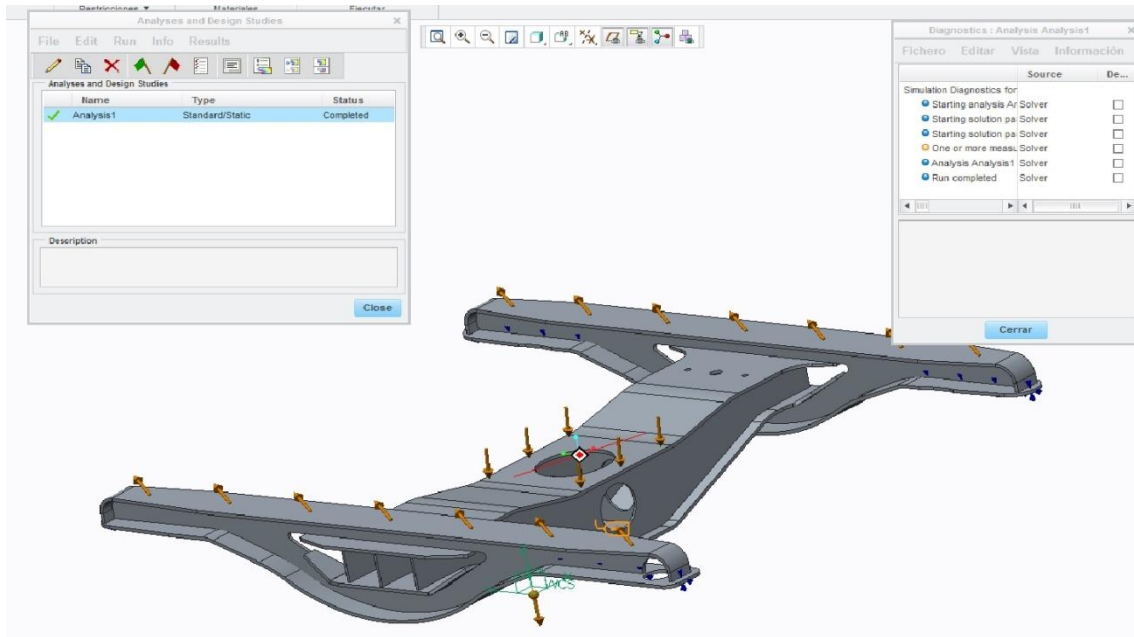


Figura 6.1.Diagnóstico en PTC-Creo Simulate

En los resultados se puede apreciar que los mayores esfuerzos se localizan en la parte del bastidor donde hay mayor transmisión de carga debido al paso por curva. Es procedente recordar, que la simulación en SimPack, se hallan las cargas soportadas en el bogie en condiciones adversas de funcionamiento. La simulación se lleva a cabo con trayectoria curva y con oscilación aleatoria de la vía a una velocidad de 100 Km/h.

Previsiblemente, debido a la aceleración del vehículo, una de los largueros soportará mayor carga que el otro. En los valores de tensión según el criterio de Von Mises, se tienen mayores esfuerzos en uno de los largueros sin llegar a suponer riesgo de rotura por fluencia. El valor de la tensión de Von Mises en el punto más crítico es de 214 Mpa.

La figura 6.2 muestra los resultados obtenidos de la tensión de Von Mises.



Figura 6.2. Resultados de la tensión de Von

El desplazamiento más elevado producido en el bastidor tiene lugar en la unión entre el larguero 1, de acuerdo a la orientación de las cargas que se transfieren hacia el larguero opuesto debido al paso por curva. El mayor valor de desplazamiento es de 0.125 mm. La figura 6.3 muestra los resultados obtenidos del desplazamiento.

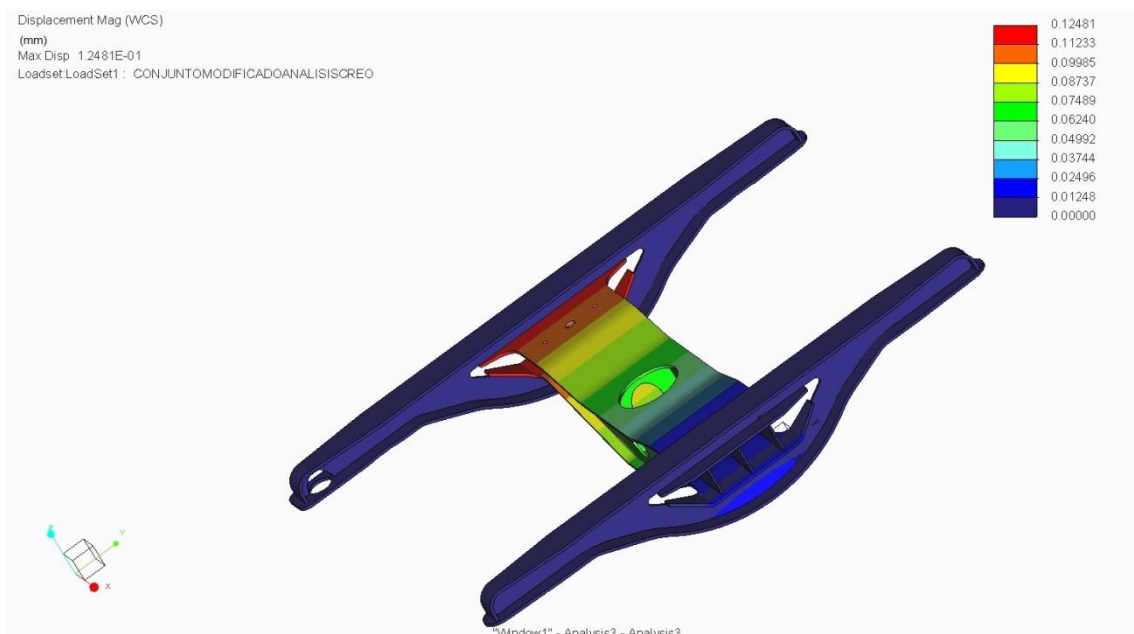


Figura 6.3. Resultados del desplazamiento

Previsiblemente, los resultados para la fuerza principal máxima tendrán la misma forma que en los obtenidos para la tensión de Von Mises. Se observa una mayor carga soportada por el larguero del bastidor donde se transfiere la carga debida a la orientación de los esfuerzos aplicados. El valor máximo de la fuerza es de 9.35 KN. En la figura 6.4 se muestran los resultados obtenidos de la fuerza principal máxima.



Figura 6.4. Resultados de la fuerza principal máxima

Capítulo 7.

Conclusiones y trabajos futuros

Se ha realizado el modelado del bastidor de un bogie en el programa SolidEdge. Posteriormente se ha implementado el modelo en el programa PTC-Creo para ser sometido a un análisis estructural. Los resultados obtenidos en el análisis nos muestran una previsión del comportamiento del diseño frente a sollicitaciones externas.

7.1. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas tras la realización de este Trabajo de Fin de Grado son las expuestas a continuación:

- El modelo realizado en SolidEdge del bastidor del bogie, es un diseño válido para su utilización en futuros proyectos y su geometría cumple con los requerimientos necesarios para su implementación en PTC-Creo o en otros programas de análisis como SolidWorks.
- El análisis realizado en PTC-Creo muestra el comportamiento del modelo y servirá como manual de empleo para futuros estudiantes.
- Los resultados obtenidos de la tensión de Von Mises muestran que, en las condiciones establecidas, la estructura del bastidor permanece intacta, siendo los valores máximos de tensión muy inferiores al valor de límite elástico del material.
- Los resultados obtenidos para el desplazamiento muestran valores inferiores a un milímetro, lo cual es asumible para un modelo real.
- Los resultados obtenidos para la fuerza principal máxima muestran reducidos valores de fuerza aplicados en la estructura, sin riesgos para la integridad estructural del bastidor.

7.2. Trabajos futuros

A partir de lo realizado en este Trabajo de Fin de Grado, se pueden realizar los siguientes trabajos futuros:

- Análisis del modelo en PTC-Creo utilizando otro tipo de material de menor coste que el acero, o con mejores propiedades, y comparar los resultados obtenidos.
- Una alternativa de diseño es reforzar los largueros utilizando dos piezas del alma unidas entre sí pero huecas en su interior, para dar robustez a la estructura y mejorar las uniones.
- Aumentar la velocidad de paso por curva en la simulación en SimPack y comparar resultados.
- Unir las piezas del modelo por soldadura en SolidEdge, manteniendo los bordes redondeados del diseño inicial del bastidor.

Referencias

- [1] “*Agenda Estratégica de Investigación del Sector Ferroviario*”, Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española.
- [2] Renfe Cercanías. Nuestros trenes. Obtenido de <http://www.renfe.com/>
- [3] Viajes ferroviarios de ayer, de hoy y de mañana.
<http://viajesferroviarios.blogspot.com.es/2012/12/por-donde-esta-circulando-mi-tren.html>
- [4] Rebollo Giménez, F J.(2012).*Análisis de ejes Ferroviarios mediante el Método de Elementos Finitos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España.
- [5] Baamonde Roca, A, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *El Tren de Rodaje de los Vehículos Ferroviarios*.
- [6] Gottfried Kure, Director de Marketing , Railway Business Unit, SKF, Austria. *Evolución de las Cajas de Grasa para Trenes* .Artículo de *Evolution, Business and Technology Magazine from SKF*.
- [7] Jurado Zurro, J.(2010). *Estudio del Comportamiento Dinámico de un Vehículo Ferroviario Equipado con Suspensión Secundaria Semiactiva Utilizando Lógica Difusa*. Universidad Carlos III de Madrid, España.
- [8] Meneses Amador, A. (2006)*Análisis Estructural del Bastidor de Truck del Conjunto Chasis de Bogie de los Vagones de Transporte Colectivo Metro*. Tesis doctoral. Mexico.
- [9] Meneses Alonso, J,Álvarez Caldas ,C y Rodríguez Fernandez, S. *Introducción al SolidEdge*.
- [10] Jouni Ahola. *Creo Parametric Modeling for Manufacturing*.
- [11] Ottosen and Ristinmaa. *The Mechanics of Constitutive Modeling*. Elsevier2005.
- [12] Álvarez Mántarás, D, Luque Rodríguez,P. *Ingeniería e infraestructura de los transportes*.Universidad de Oviedo.